# Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

APRIL 2007 4/07


AUTISMUS
Fehlfunktion der Spiegelneuronen

ESSAY
Gibt es Fortschritt?

DEMOKRATIE
Wählen mit doppelter Gerechtigkeit

# Im Griff der Dunklen Energie

Diese mysteriöse Kraft beschleunigt das Universum und beeinflusst das Schicksal der Galaxien


6,90 € (D/A) · 13,50 sFr/Luxemburg 8,– €
D6179E

Reinhard Breuer
Chefredakteur

# Handeln bei unvollständiger Information

**Es schlug schon gewaltige Wellen,** als Anfang Februar das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) in Paris seinen 4. Klimareport herausbrachte. Eigentlich war es ja nur die Zusammenfassung des wissenschaftlichen Teils (die Teile über Folgen und Maßnahmen stehen noch aus), aber die Wirkung ließ nicht auf sich warten. Nun sei, wie das Fachblatt »Nature« befand, nach dem »offensichtlichen« wissenschaftlichen auch ein »politischer Konsens« in Reichweite, der das Problem »endlich anerkenne«.

Ist das wirklich so? Liegt der – wünschenswerten – politischen Akzeptanz tatsächlich bereits ein Konsens der Wissenschaft zu Grunde? Wie unser Autor Sven Titz in seinem Beitrag ab S. 26 klar macht, ist in der jetzt verschiedentlich ausbrechenden Untergangshysterie auch etwas Skepsis angebracht. Das ist kein Abwiegeln, sondern eine Frage der **wissenschaftlichen Redlichkeit**.

Solange noch ernste Probleme bestehen (etwa bei den Ozeantemperaturen) – und zu denen bekennen sich auch Forscher, die am IPCC mitgewirkt haben –, sollte sich auch die Klimaforschung insgesamt nicht zu sehr aus dem Fenster lehnen. Es sei nicht auszuschließen, dass es da **eine Art Eskalationszwang** gibt, mutmaßt der promovierte Meteorologe Titz. Dieser Zwang nötige die Berichterstatter vielleicht, von Mal zu Mal höhere Gewissheiten zu behaupten, und sei es nur um einer größeren Wirkung willen.

Auch Sprachfeinheiten sind zu beachten: Was im Englischen als »body of evidence« firmiert, gerät im Deutschen rasch zu »Beweismaterial«, auch wenn es sich in diesem Kontext eher um eine Indiziensammlung handelt. Selbst mit »Prognosen« und »Projektionen« sollte man vorsichtig umgehen, und schon gar nicht Letztere für Erstere halten. Es ist ein **Dilemma**: Wie handeln bei unvollständiger Information? Eigentlich ist das normal. Ärzte müssen akute Fälle immer schon sofort behandeln, Politiker müssen Gebiete evakuieren lassen, wenn ein Vulkanausbruch droht – der dann vielleicht doch nicht eintritt.

Doch bei der Klimaerwärmung handelt es sich nicht um ein lokales oder temporäres Problem. Hier auf der sicheren Seite zu stehen, erfordert globale Klimaschutzmaßnahmen ungeahnten Ausmaßes. Denn dass Klimaprojektionen unsicher sind, macht sie nicht notwendigerweise falsch. Umso mehr ist Transparenz geboten. »Was würde es für die Glaubwürdigkeit der Forscher bedeuten«, gibt Sven Titz zu bedenken, »wenn in zehn Jahren ganz andere Projektionen präsentiert werden?«

**Erstmals hatten wir vor einigen Wochen** einen Beitrag vorab ins Internet gestellt und Sie zur Diskussion eingeladen (www.spektrum.de/fortschritt). Den Essay »Die Fortschrittsillusion« finden Sie zusammen mit einer **Auswahl der Leserreaktionen** sowie einer Replik des Autors ab S. 108.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

# INHALT

## SPEKTROGRAMM


12 Beamen von Licht · Himmelsauge mit staubiger Pupille · Autobahn für Hirnzellen · Ultraviolettes Flirtsignal u. a.

15 **Bild des Monats**
Saturnringe von oben


## FORSCHUNG AKTUELL


16 **Krebsdiagnose mit Xenon im Käfig?**
Ein neues Verfahren zur Abbildung molekularer Vorgänge in der Zelle

19 **Von wegen Müll!**
Abfallprodukt entpuppt sich als Drahtzieher der Genregulation

21 **Parfümierte Stinker**
Nützliche, aber übelriechende Stoffklasse erhält angenehme Duftnote

22 **Superatom aus Quasiteilchen**
Bose-Einstein-Kondensat bei Raumtemperatur erzeugt


## THEMEN


26 KLIMAPROGNOSEN
**Noch viele offene Fragen**

▶ 32 TITELTHEMA ASTRONOMIE
**Dunkle Energie beeinflusst Galaxien**

▶ 42 NEUROLOGIE
**Besteht eine Verbindung zwischen Autismus und Spiegelneuronen?**

50 MEERESÖKOLOGIE
**Abgestorbene Küstengewässer lassen sich renaturieren**

58 GENOMFORSCHUNG
**Pseudogene nicht völlig nutzlos**

70 COMPUTERGRAFIK
**Deutlich verbessertes Ray-Tracing**

▶ 76 WAHLVERFAHREN
**Eine doppelt gerechte Zuteilungsmethode für Wählerstimmen**

82 CHEMIE
**Abdrücke von Molekülen in Plastik**

92 RECHENSCHIEBER
**Nachruf auf ein Allround-Genie**

108 ESSAY
▶ **Fortschritt nur eine Illusion?**

KLIMAPROGNOSEN

## Wolkige Szenarien

Nach dem jüngsten IPCC-Bericht ist Klimaschutz angesagt. Doch die wissenschaftliche Basis der Klimavorhersagen bleibt verbesserungsbedürftig

SEITE 42

AUTISMUS

## Der blinde Spiegel

Eine Störung im Neuronensystem, das Aktionen anderer Menschen widerspiegelt, könnte für Autismus mitverantwortlich sein. Daraus ergeben sich neue Therapieansätze für das rätselhafte Leiden

SEITE 50

MEERESÖKOLOGIE

## Totes Meer – wiederbelebt!

Küstennahe Gewässer sterben, wenn sie überdüngt werden. Eine Renaturierung wie im Toten Meer ist möglich, erfordert jedoch drastische Eingriffe in regionale Landwirtschaft

SEITE 58

GENETIK

## Das heimliche Wirken der Pseudogene

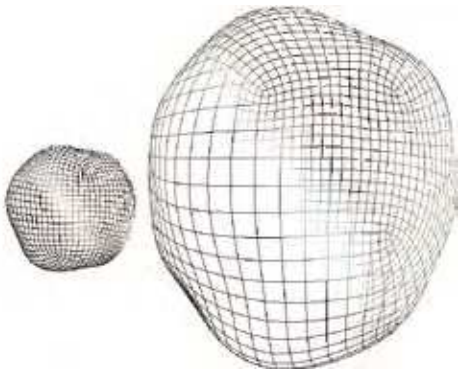
Unser Erbgut ist mit defekten Genen durchsetzt, viele davon lädierte Relikte der Evolution. Manche greifen allerdings auch heute noch ins Zellgeschehen ein, indem sie etwa die Funktion verwandter Gene überwachen

SEITE 70

COMPUTERGRAFIK

## Die Kunst, Lichtstrahlen zu berechnen

Verbesserte Bildqualität erreichen jetzt Computergrafiker durch Fortschritte beim Ray-Tracing



TITELTHEMA ASTRONOMIE SEITE 32

# Im Griff der Dunklen Energie

Vor einem Jahrzehnt entdeckten Astronomen, dass sich die Expansion des Kosmos beschleunigt. Neuen Arbeiten zufolge hat dies in der Verteilung und den Formen der Galaxien deutliche Spuren hinterlassen

SEITE 76

WÄHLEN IN ZÜRICH

## Die Mathematik der doppelten Gerechtigkeit

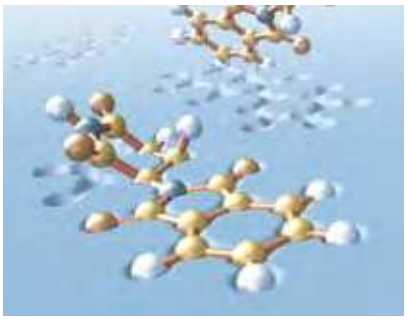
Ein Wahlverfahren gewinnt allgemeine Zustimmung, weil es – mathematisch beweisbar – als einziges eine doppelte Forderung nach Gerechtigkeit erfüllt

SEITE 82

CHEMIE

## Moleküle aus der Gussform

Abdrücke und Imitate von Biomolekülen aus Plastik könnten vor Bioterror-Angriffen warnen, die Umwelt entgiften und die Entwicklung neuer Medikamente beschleunigen



SEITE 92

RECHENSCHIEBER

## Als Rechner noch geschoben wurden

Schon 1622 erfunden, avancierten Rechenschieber im letzten Jahrhundert zum unverzichtbaren Utensil von Wissenschaftlern und Technikern. Taschenrechner und PCs machten dem nützlichen Begleiter schließlich den Garaus


KOMMENTAR

**24** SPRINGERS EINWÜRFE
**Krippenkinder und Rabenmütter**

WISSENSCHAFT IM ...

**40** **Alltag:** Rabbit Prototyping – schnelle Modelle für Osterhasen

**69** **Rückblick:** Tünchmaschine · Schmerzloses Zähnebohren · Diät gegen Erbkrankheit u. a.

JUNGE WISSENSCHAFT

**88** **Das Projekt »Schüler an Hochschulen«**

REZENSIONEN

**100** **Leben – Bilder aus dem Inneren des menschlichen Körpers** von Lennart Nilsson und Hans Wigzell
**Anybody Out There?** von Dagmar Röhrlich
**Bioethik zwischen Natur und Interesse** von Dieter Birnbacher
**Erlebnis Wissen** von Hendrik Neubauer (Hg.)

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

**104** **Die Vielseitigkeit der Rollkurven**
Man findet sie unter Kaustiken ebenso wie im Bauch von Apfelmännchen

WEITERE RUBRIKEN

**3** **Editorial**
Handeln bei unvollständiger Information

**8** **Leserbriefe**

**10** **Impressum**

**107** **Preisrätsel**

**114** **Vorschau**


*Titelillustration: Kenn Brown*

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

# Spektrum ONLINE

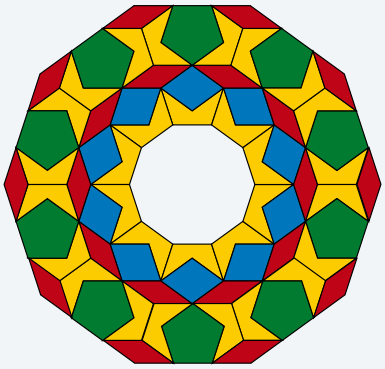
Spektrum newsletter

◀ ÜBERBLICK

## Neues aus dem Verlag

Auf Wunsch senden wir Ihnen regelmäßig per E-Mail (»Newsletter«)
▶ jeweils zum Erscheinungsdatum die Inhaltsverzeichnisse der Magazine Spektrum der Wissenschaft, Gehirn&Geist, Abenteuer Archäologie, Sterne und Weltraum sowie Astronomie heute
▶ jeden Montag einen Überblick über unser aktuelles Online-Angebot

www.spektrum.com/newsletter



◀ GEOMETRIE

## Pflastern Sie mit

Ein von einem Amateur entdeckter Pflasterstein (die »Krone«) bringt neues Leben in die Diskussion über die fünfzählig-symmetrischen, nichtperiodischen Parkettierungen der Ebene (»Penrose-Parkette«). Noch gibt es viele Möglichkeiten zu entdecken, wie man die Krone, das Fünfeck, dünne und dicke Rauten zu neuen Mustern zusammensetzen kann. Beteiligen Sie sich an der Suche unter www.spektrum.de/artikel/867615

**5x5 Die Rezension des Monats** von spektrumdirekt

| | 1 • 2 • 3 • 4 • 5 |
|---|---|
| Inhalt | ■■■■■ |
| Didaktik | ■■■■■ |
| Suchen/Finden | ■■■■■ |
| Lesespaß | ■■■■■ |
| Preis/Leistung | ■■■■■ |
| Gesamtpunktzahl | 25 |

◀ REZENSION

## William K. Purves u. a.: Biologie

Nun gibt es ein bestens gelungenes Lehrbuch in neuer Auflage. Die Verfasser legen großen Wert auf die Vermittlung wichtiger Forschungsmethoden; didaktisch ansprechende Geschichten machen die Einzelkapitel interessant und den »Purves« gut lesbar. Nie waren die Einstiegssemester in Biologie angenehmer zu bewältigen.

*Aus der Rezension von Daniel C. Dreesmann*

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen finden Sie unter www.spektrumdirekt.de/5x5

◀ SPEKTRUM-PLUS: ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

## Die Eindämmung des Kohlendioxids

Dem Anstieg der Treibhausgase Einhalt zu gebieten ist ein gigantisches Unterfangen – aber machbar. Die Technologien dazu gibt es bereits. Aber wir dürfen keine Zeit verlieren.

Dieser Artikel ist für Abonnenten frei zugänglich unter www.spektrum-plus.de

**Sie suchen einen Artikel** aus einem früheren Heft von Spektrum der Wissenschaft?

Geben Sie auf www.spektrum.de einen oder mehrere charakteristische Begriffe in das Feld »Suche Artikel« ein, wählen Sie unter »Archiv« das gewünschte Heft oder geben Sie dort einen Suchbegriff ein. Alle Artikel ab Januar 1993 sind abrufbar; für Abonnenten kostenlos

# PUBLIKATIONEN

zu Themen
in diesem Heft

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 26

TREIBHAUSEFFEKT

## Klimawandel auf der Erde

Unser Planet hat Fieber und schuld ist der Mensch. Eine erdrückende Fülle von Indizien belegt mittlerweile den Klimawandel

SDW DOSSIER 2/2005

**Die Erde im Treibhaus**

Fiebernder Globus

Schmelzendes Polareis

Kippt Europa in den Eiskeller?

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 76

WAHLVERFAHREN

## Wer wird Präsident?

Eigentlich sollte immer der Kandidat als gewählt gelten, der dem Willen der Wähler am genauesten entspricht – ein unerreichbares Ziel

SDW DOSSIER 5/2006

**Fairness, Kooperation, Demokratie**

Die Mathematik der Gerechtigkeit

Teilen und Helfen

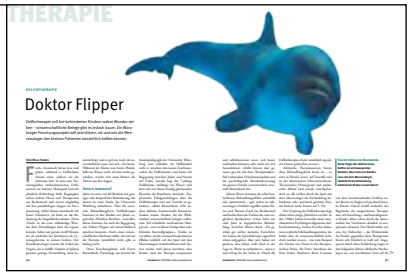
Spiele auf Leben und Tod

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 42

DELFINTHERAPIE

## Doktor Flipper

Ein Forschungsprojekt soll jetzt klären, ob und wie die Meeresäuger behinderten, darunter autistischen Kindern tatsächlich helfen können
www.gehirn-und-geist.de/artikel/849211



G&G DOSSIER 2/2006

**Intelligenzbestien**

Papageien als pfiffige Plauderer

Spürnase im Einsatz

Empfindsame Wesen

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 32

ASTRONOMIE

## Galaxien vom Urknall bis heute

Seit ihrer Entstehung haben sich die Galaxien durch Kollisionen und Beinahezusammenstöße vielfach gegenseitig beeinflusst

SUW SPECIAL 1/2003

**Das junge Universum**

Quasare und Schwarze Löcher

Ursprung der Elemente

Geburt der Welteninseln

Diesen Artikel finden Sie als kostenlose Leseprobe im Internet. Unsere Sonder- und Monatshefte sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon: 06221 9126-743

## Glaube versus Rationalität

Vom Glauben zum Wissen und zurück
Essay, Januar 2007

### Bedeutung der Klöster

Herr Springer wählt in seinen Darstellungen die Tatsachen so aus, dass sie in sein Argumentationskonzept passen.

Die christliche Kirche sei stets hemmend und Neuem gegenüber nicht aufgeschlossen gewesen. Hier muss natürlich sofort Galilei herangezogen werden, wie natürlich auch nicht verschwiegen werden darf, dass Kardinal Ratzinger quasi die historische Verlängerung der Inquisition ist. Dass über Jahrhunderte die Ausbreitung von Schrift, Literatur und Kunst nur über die Klöster erfolgte, braucht in so einer Argumentation selbstverständlich nicht weiter beachtet zu werden.

Im weiteren Verlauf sind nicht alle Gedanken schlecht, aber eben stark mit Polemik verwoben. Der Spott von Ernst Haeckel über Gott als gasförmiges Wirbeltier ist einfach nur beleidigend und hätte in einem seriösen Artikel nichts zu suchen.

Prof. Jürgen Schnack, Bielefeld

### Rolle der Religion

Es ist erfreulich, dass sich ein Naturwissenschaftler mit der Regensburger Vorlesung Benedikts XVI. auseinandersetzt. Allerdings erweckt der Artikel den Eindruck, als seien die Naturwissenschaften und ihre Methoden senkrecht vom Himmel gefallen. Die Anwendung naturwissenschaftlicher Prinzipien hat vielmehr eine lange Entwicklungsgeschichte, in der die Religion eine wichtige Rolle spielte.

Dass der Glaube immer eine Verpflichtung gegenüber der Vernunft hat, ist im Christentum von Anfang an klar. Sie beweist sich aber nicht durch Zitate aus Bibel und Theologiegeschichte, sondern in der Anwendung auf tägliche Probleme, und da fehlt es leider.

Prof. em. F. Burgey, Eichstätt

## Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

## Tierversuch nicht mehr Goldstandard

Ersatz für Tiervesuche – nicht nur zum Tierschutz, Februar 2007

Erfreulich – die tierversuchsfreie Forschung kommt voran. Doch darf der Enthusiasmus über einige Fortschritte nicht darüber hinwegtäuschen, dass wir von einer wirklichen Lösung des Problems leider noch meilenweit entfernt sind. Was wir brauchen, ist ein vollständiger Paradigmenwechsel in Forschung und Produktprüfung, bei dem der Tierversuch nicht mehr als Goldstandard gilt.

So ist es allenfalls als Zwischenschritt anzusehen, wenn beim LD50-Test nicht mehr 140, sondern »nur« noch 16 Tiere zu Tode gequält werden. Eine grausame und falsche Methode wird nicht dadurch besser, dass weniger Tiere eingesetzt werden. Es ist absurd, wenn sich neue, aussagekräftige Testmethoden an der schlechten, erwiesenermaßen unzuverlässigen Methode Tierversuch aus dem vorletzten Jahrhundert messen lassen müssen, um anerkannt zu werden.

Tierversuche müssen abgeschafft werden, um den Weg frei zu machen für eine ethisch vertretbare, am Menschen orientierte Forschung und Medizin.

Dr. med. vet. Corina Gericke, Ärzte gegen Tierversuche e. V., Braunschweig

## Retten mit fragwürdigen Methoden

Tierversuche und ihre Gegner
Editorial, Februar 2007

Ich teile Ihre Kritik an bestimmten Aktionen mancher »Tierschützer«. Wir verdanken der kritischen Aufmerksamkeit von Tierschützern zwar, dass immer wieder unglaubliche Tierquälereien aufgedeckt wurden und zum großen Teil der Vergangenheit angehören. Befreiungsaktionen sind aber kriminell, destruktiv, kontraproduktiv, naiv bis dumm, in jeder Hinsicht fragwürdig und erschreckend fundamentalistisch. Manch andere Äußerung oder Handlung von Tierschützern gehört in die gleiche »Ecke« (Totalablehnung der Jagd, des Fleischverzehrs, der Nutzung tierischer Produkte etc.). Sogar Gesetzgebung und Rechtsprechung gehen hier manchmal zu weit, etwa wenn die Besenderung von Wildtieren für wissenschaftliche Untersuchungen rechtlich als »Tierversuch« gilt, und nicht etwa qualifizierte Ethologen, sondern Kreisveterinärbehörden über Zulassung oder Nichtzulassung zu entscheiden haben – aber das steht auf einem anderen Blatt.

Karsten Dörfer, Heinade

## Talent und Motivation

Wie Genies denken, Januar 2007

### Breitensport Schach

Endlich ein Artikel, der das Schachspiel für das Denkenlernen in den Vordergrund stellt. Leider erhält dieser Sport in unserer Gesellschaft nicht die Aufmerksamkeit, die ihm von seiner Bedeutung her zusteht. Im Artikel werden fast ausschließlich amerikanische Untersuchungen als Grundlagen genommen. Ich darf zu bedenken geben, dass in den USA im Vergleich relativ wenige Großmeister entstanden sind.

Immer noch an der Spitze – und hier auch als Volkssport – steht das Schachspiel in Osteuropa. Genau dort gehört es – immer noch – zum Schulunterricht. Hier ist es also ein Zusammenspiel von Talentförderung und gesellschaftlicher Anerkennung. Ein ausgeprägt geförderter Breitensport bringt automatisch auch viele Spitzenspieler hervor. Doch so sieht es bei uns leider nicht aus.

Jochen Krehnke, Bad Münder

### Arbeitsgarantie für Familientherapeuten

Die Behauptung, dass Anlagen und Talent im Vergleich zur Motivation nur eine untergeordnete Rolle spielen, die man nur – möglichst bereits pränatal – kräftig drillen müsse, kommt einer Arbeitsgarantie für Familientherapeuten nahe, die sich bereits kräftig über volle Praxen mit am Ehrgeiz der Eltern gescheiterten Kindern freuen dürfen. Ich wäre gespannt über die Ergebnisse einer vergleichenden Studie über Alkoholismus von Fußballern,

## Öltanker ist kein Vergleich

# Wie das Klima Berge versetzt

Februar 2007

STEFFEN FOERSTER / WORLDOFSTOCK.COM

**Der Himalaya entstand durch die Kollision Indiens mit Eurasien.**

**Auf S. 54 vergleicht Kip Hodges** in seinem sehr anschaulichen Artikel über die Entwicklung des Himalaya die noch immer andauernde Kollision der beteiligten Kontinente Indien und Eurasien mit dem langen Bremsweg von Öltankern und Güterzügen. Explizit macht er die Massenträgheit der indischen Platte für das Kollisionsgeschehen verantwortlich. Der Vergleich mit dem Öltanker ist ein häufig verwendeter; vor allem in Vorträgen und Artikeln, die sich an ein allgemeines Publikum wenden, jedoch auch in Vorlesungen der Geologie an mancher Hochschule. Der Vergleich ist jedoch unzulässig und physikalisch falsch, wie sich anhand einer einfachen Rechnung zeigen lässt:

Die kinetische Energie eines Körpers ist $E_{kin} = 1/2\ mv^2$. Der indische Kontinent hat in etwa die Form eines gleichschenkligen, rechtwinkligen Dreiecks mit 3000 km Kantenlänge. Die Mächtigkeit der Lithosphäre beträgt zirka 100 km, wonach sich das Volumen zu etwa $4{,}5 \cdot 10^{17}$ m³ berechnet. Die Multiplikation mit der ungefähren Dichte von Gesteinen der Lithosphäre von 3000 kg/m³ ergibt eine Masse von $1{,}35 \cdot 10^{21}$ kg.

Die Geschwindigkeit von driftenden Platten beträgt in etwa 10 cm pro Jahr, das sind $3{,}2 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Die kinetische Energie beträgt also $E_{kin} = 0{,}5 \cdot 1{,}35 \cdot 10^{21}$ kg $\cdot\ (3{,}2 \cdot 10^{-9}\ \text{m/s})^2 =$ 6800 J oder 6,8 kJ.

Die kinetische Energie des größten Öltankers »Jahre Viking« beträgt bei voller Ladung (560 000 t) und voller Fahrt (15,8 Knoten = 8,1 m/s) ungefähr 37 Millionen kJ.

Um den geringen Energiebetrag der indischen Platte zu veranschaulichen, soll er in Bezug zur Hebung des Himalaya gesetzt werden. Die potenzielle Energie, die notwendig ist, um ein Stück Granit auf die Höhe des Mount Everest zu heben (8848 m), berechnet sich zu $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$. Unter Vernachlässigung von Deformation und der Erzeugung von Reibungswärme soll die kinetische Energie vollständig in potenzielle Energie umgewandelt werden; es gilt also $E_{kin} = E_{pot}$. Die Masse des Gesteins, welches auf die Spitze des Everest gelangen kann, ist demnach $m = 6800/(9{,}81 \cdot 8848)$ kg = 78 g. Dies entspricht einem Granit-Würfel der Kantenlänge 3 cm.

**Offensichtlich ist also** der Beitrag der kinetischen Energie der driftenden Platten zur Entstehung von Kollisionsgebirgen praktisch gleich null. Das Beispiel zeigt in hervorragender Weise, wie sehr uns die Intuition in der Abschätzung physikalischer Prozesse täuschen kann, wenn es um nichtlineare Prozesse geht. Schon die Handhabung der Beziehung »Energie ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit« übersteigt, wenn wir ehrlich sind, unser Vorstellungsvermögen.

Nun könnte man darüber hinaus einen Blick auf die Impulserhaltung werfen, da der Impuls linear zur Geschwindigkeit wächst, und in unserem Beispiel für die indische Platte etwa 4,3·1012 Ns beträgt. Das entspricht dem Impuls von ziemlich genau 1000 Öltankern aus dem oberen Beispiel – nicht eben beeindruckend im geologischen Maßstab. Der Stoß der beiden Platten, Asien und Indien, ist ein unelastischer Stoß, das heißt, die beiden Körper bewegen sich nach der Umwandlung der kinetischen Energie in Verformungsarbeit, potenzielle Energie und Wärme mit einer gemeinsamen Geschwindigkeit als ein Körper weiter. In diesem Fall ist die Relativbewegung beendet, und der Himalaya fällt der Erosion zum Opfer. Wie wir oben gezeigt haben, wird die geringe kinetische Energie der indischen Platte jedoch schon abgebaut, wenn in China der erste Sack Reis umfällt. Damit sollten sich nach den Gesetzen der Trägheit die beiden Kontinente gemeinsam sehr langsam weiter nach Norden bewegen, aber es sollte kein Gebirge entstehen.

Der Grund für die immense Deformation der Kruste und die Fortbewegung der Platten ist also nicht mit der Trägheit der Masse zu erklären. Vielmehr bewegen sich die Platten aus dem gleichen Grund weiter, aus dem sie sich schon vor der Kollision bewegt haben: der konvektierende Mantel unter ihnen schiebt sie vorwärts und der abtauchende ozeanische Teil der Platten zieht sie vorwärts.

**Horst Marschall, Bristol und Erich Marschall, Nußloch**

die es trotz brennender Motivation nicht geschafft haben.

Kleiner Tipp: Der Farbenblinde wird kein Maler, der Zwergwüchsige scheitert im Basketball, wem Gott kein gutes Gehör geschenkt hat, der sollte besser seinen Ehrgeiz nicht auf Musik lenken.

Förderung – auch früh: Ja bitte! Rücksichtsloser Drill, nein danke.

**Heiner Schilling, Darmstadt**

# Fehlerfreie Programme

Neue Wege zu sicherer Software
Januar 2007

### Nicht zu optimistisch werden!

Der Artikel war sehr interessant. Allerdings fand ich die (bei genauem Lesen vorhandenen) Warnungen vor übertriebenen Hoffnungen auf fehlerfreie Software durch den Einsatz automatischer Prüfsoftware zu schwach. Es wurde eher im Gegenteil die Erwartung von möglicher Null-Fehler-Software erzeugt.

Software wie Alloy einzusetzen halte ich für grundsätzlich wichtig, um die Fehlerzahl zu reduzieren! Und ich bezweifle keineswegs die Fähigkeit von Alloy und anderen Tools, Fehler zu finden, wohl aber die Fähigkeit, alle Fehler ▷

▷ (im Design) zu finden, wenn das Projekt hinreichend groß wird.

Software-Designs werden auch so nicht hundertprozentig fehlerfrei werden. Schließlich sind auch Alloy und Co. nur Programme, die selbst der Unvollkommenheit unterliegen. Wer sich auf »der sicheren Seite« (auf der »sichereren« Seite ist sehr wohl möglich) wähnt, nur weil er Alloy oder ein ähnliches Tool eingesetzt hat, ist ein leichtes Opfer seines Wunschdenkens.

Jürgen Busch, Limburg

### Entwicklungskosten bei Ariane

In dem interessanten Aufsatz ist dem Autor ein logischer Fehler unterlaufen, wenn er anlässlich des Absturzes der ersten Ariane-5-Rakete schreibt: »Mit ihr verpufften gut 6 Milliarden Euro an Entwicklungskosten.« Das liest sich so, als seien diese 6 Milliarden Euro komplett verloren. Tatsächlich verloren, was die Entwicklung der Rakete betrifft, waren dagegen »nur« die weiteren Flugphasen und damit die – ohne diesen Fehler – vielleicht erfolgreiche Qualifikation der an diesen Phasen beteiligten Komponenten (zu diesem frühen Versagenszeitpunkt allerdings die überwiegende Mehrzahl aller Komponenten). Verloren war darüber hinaus auch die wertvolle wissenschaftliche Nutzlast »Cluster«, für die man die mit mehr Risiken behaftete, aber dafür kostenlose Mitfluggelegenheit auf der ersten, also zuvor nicht erprobten Ariane-5-Trägerrakete gewählt hatte. Es gilt also, zwischen Entwicklungs- und Wiederbeschaffungskosten zu unterscheiden.

Peter Groepper, Wassenaar, Niederlande

## Atmung bei Haien

Ein Flugzeug für den Weltraum
Februar 2007

In Ihrem sehr interessanten Artikel über Flugzeuge mit Scramjet-Technik wurden diese mit Haien verglichen, die unentwegt vorwärtsschwimmen müssen, um ihren Sauerstoffbedarf zu decken. Im Gegensatz zu früheren Lehrmeinungen können jedoch alle bekannten Haiarten ihren kompletten Sauerstoffbedarf auch im Ruhen aufnehmen, da sie zum aktiven Ventilieren befähigt sind. Da ich selbst in einem Meeresaquarium gearbeitet habe, konnte ich diese Atemtechnik häufig beobachten. Auch wenn große Haie, wie der Weiße Hai oder der Riesenhai, meist ständig in Bewegung sind, ersticken sie bei Bewegungslosigkeit nicht. Evolutiv wäre dies auch wenig sinnvoll, da ein Schwimmen des Hais mit der Strömung seinen sicheren Tod bedeuten würde.

Heiko Schmied, Bonn

## Kein wirklicher Schutz

Angriff der mobilen Computerviren
Februar 2007

Der Artikel zeigt grob, was mit gespeicherten Verbindungsdaten alles gemacht werden könnte und schon gemacht wird. Dabei wird aber von Laborbedingungen ausgegangen, die so nicht existieren. Hilft uns die Vorratsdatenspeicherung im ohnehin schon umstrittenen Kampf gegen Terrorismus? Nein.

Telekommunikationsverbindungen werden automatisch, das heißt von Computern aufgebaut. Man könnte nun Software laufen lassen, die nach bestimmten Mustern Verbindungen erzeugt und Daten für einen bestimmten Zeitraum sendet. Und das nur, um den Verbindungsgraphen zu stören. Es können beliebige Scheinverbindungen im Verbindungsgraphen entstehen. Es gibt Software, die Telekommunikation ermöglicht, ohne dass der Sender je erkannt werden kann.

Wo ist der Unterschied zwischen dem Telekommunikationsverkehr einer Terrorzelle, die kurz vor der Ausführung eines großen Anschlags steht, und dem eines Bürgerrechtsvereins, der kurz vor der Ausführung einer wichtigen Demonstration steht? Welche Gruppe wird denn nun vom Verfassungsschutz eher überwacht? Es läuft darauf hinaus, dass jeder überwacht und jeder verdächtigt wird, und das darf in einem Rechtsstaat nicht geschehen.

Gilbert R. Röhrbein, Leipzig

## Errata

### Ursprünge der griechischen Sternbilder, März 2007

Leider sind zwei der drei auf S. 86 gezeigten Ausschnitte der Oberfläche des Himmelsglobus des Atlas von Farnese falsch datiert: der mittlere zeigt die Lage des Frühlingspunkts im Jahr 125 v. Chr. (statt 100 v. Chr.) und der untere im Jahr 200 n. Chr. (statt 2000 n. Chr.).

### Mit Grips unterhalten Rezensionen, März 2007

Die Herausgeber des Buches »Braintertainment«, das auf S. 103 besprochen wurde, sind Manfred Spitzer und Wulf Bertram.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
**Stellvertretende Chefredakteure:** Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
**Redaktion:** Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer
**Schlussredaktion:** Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
**Art Direction:** Karsten Kramarczik
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
**Redaktionsassistenz:** Eva Kahlmann (Online Coordinator), Ursula Wessels; Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Heidelberg, HRB 338114
**Verlagsleiter:** Dr. Carsten Könneker
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck
**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Werner Gans, Dr. Rainer Kayser, Dr. Andreas Schmidt-Rhaesa, Claus-Peter Sesín, Prof. Dr.-Ing. Philipp Slusallek, Annette Zimmermann.

**Leser- und Bestellservice:** Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
**Bezugspreise:** Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
**Anzeigen:** GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
**Anzeigenvertretung:** Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005;
Hamburg: Siegfried Sippel, Brandstwiete 1 / 6.OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hartmut Brendt, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2062, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55;
Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49;
München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
**Druckunterlagen an:** GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 28a vom 01. 01. 2007.

**Gesamtherstellung:** Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

**SCIENTIFIC AMERICAN**
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Brian Napack, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/ Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

VERHALTEN

## Ultravioletter Liebeszauber

MATTHEW L. M. LIM UND DAIQIN LI, NATIONALUNIVERSITÄT SINGAPUR

**Die Fühler von Weibchen der Spinnenart *Cosmophasis umbratica* fluoreszieren in ultraviolettem Licht grünlich.**

■ Statt schummriger Beleuchtung bringt grelles UV-Licht Springspinnen der Art *Cosmophasis umbratica* in romantische Stimmung. Das haben Matthew Lim und Kollegen von der Nationaluniversität Singapur nun entdeckt. Bisher war nur bekannt, dass Flecken auf dem Körper der Männchen – vor allem im Gesicht – UV-Strahlung reflektieren, während die Fühler der Weibchen grün aufleuchten, wenn sie davon getroffen werden. Um zu untersuchen, ob diese Leuchteffekte bei der Paarung eine Rolle spielen, setzten die Forscher die Tiere in getrennte Glaskästen. So konnten sie nichtvisuelle Einflüsse wie Gerüche oder Geräusche auf das Verhalten ausschließen. Dann drehten sie am Lichtschalter. Im vollen Spektrum begannen die Spinnen sofort mit der Balz. Filterten die Forscher jedoch die ultravioletten Strahlen aus, zeigten die Tiere keinerlei Interesse mehr aneinander.

Saßen nur die Männchen im UV-Licht, begannen die Weibchen zwar mit dem Balzverhalten, doch achtzig Prozent der Umworbenen ließ das kalt. Um in Stimmung zu kommen, fehlte ihnen offenbar die grüne Fluoreszenz. Andersherum war es genauso: Die Männchen flirteten heftig mit den strahlenden Weibchen, aber nur ein Fünftel der Damen ließ sich von einem unbeleuchteten Verehrer anmachen.

*Science, 26. 1. 2007, S. 481*

ARCHÄOLOGIE

## Ältestes Sonnenobservatorium Amerikas

■ Seit dem 19. Jahrhundert rätselten Archäologen über den einstigen Verwendungszweck einer Ringwallanlage 400 Kilometer nördlich der peruanischen Hauptstadt Lima. Mysteriös erschien vor allem eine Reihe aus 13 Türmen, die auf einer kammartigen Anhöhe im Innern genau in Nord-Süd-Richtung angeordnet sind. Auf den ersten Blick wirkt die Ruinenstätte namens Chankillo wie eine ehemalige Befestigung. Dagegen sprechen jedoch die vielen Eingänge und die fehlende Wasserversorgung.

Ivan Ghezzi von der Universidad Católica del Perú in Lima und Clive Ruggles von der Universität Leicester (England) haben nun eine Plattform im Osten und eine weitere im Westen der Anhöhe entdeckt – die westliche noch komplett erhalten –, von denen aus die Turmreihe genau den Bereich der Sonnenauf- und -untergangspunkte im Jahreszyklus abdeckt: Der Turm am einen Ende markiert die Sommer- und der am anderen die Wintersonnenwende. Demnach gehörten die Ruinen offenbar zu einer Kultstätte, die zugleich als Sonnenobservatorium diente. Ähnliche Anlagen sind auch aus der Mayazeit in Mittelamerika bekannt. Chankillo ist jedoch viel älter: Nach einer Radiokarbondatierung von Ghezzi und Ruggles wurde es schon im dritten vorchristlichen Jahrhundert erbaut.

*Science, 2. 3. 2007, S. 1239*

IVAN GHEZZI, PUCP

**Die 13 Türme der Ruinenstätte Chankillo in Peru markieren die Sonnenauf- und -untergangspunkte im Jahreslauf.**

ASTRONOMIE

## Himmelsauge mit staubiger Pupille

■ Wenn ein Stern wie unsere Sonne stirbt, nachdem er seinen Kernbrennstoff aufgebraucht hat, stößt er in seinen letzten Todeszuckungen, während er zum Weißen Zwerg schrumpft, noch die äußere Hülle ab. Aus dieser bildet sich ein so genannter Planetarischer Nebel, der im Licht der Sternenleiche vielfarbig fluoresziert. Der Raum unmittelbar um den Weißen Zwerg sollte dagegen komplett leergefegt sein. Nun entdeckte ein Team um Kate Su von der Universität von Arizona in Tucson jedoch mit Hilfe des Spitzer-Infrarot-Teleskops beim bekannten Helixnebel, der nur 700 Lichtjahre von uns entfernt im Sternbild Wassermann liegt, dass dessen Zentrum in Wahrheit ziemlich staubig ist.

NASA, JPL / CALTECH / KATE SU, UNIVERSITY OF ARIZONA

**Wie eine rote Pupille leuchtet in der Aufnahme des Spitzer-Teleskops die neu entdeckte Staubscheibe im Zentrum des Helixnebels.**

Woher kommt dieser Staub? Die Forscher erklären den überraschenden Befund damit, dass der Kometengürtel des Vorläufersterns die dramatischen Ereignisse an dessen Ende offenbar überlebt hat, dabei aber kräftig verwirbelt wurde. Bei Kollisionen miteinander haben sich die Objekte dort inzwischen anscheinend teilweise pulverisiert und so neuen Staub gebildet, der in der Spitzer-Aufnahme im Zentrum des Nebels nun dunkelrot leuchtet. Die Staubscheibe liegt etwa 35 bis 150 Astronomische Einheiten vom Weißen Zwerg entfernt – also etwa dort, wo sich im Sonnensystem der Kuipergürtel befindet.

*Astrophysical Journal Letters, 3/2007, S. L41*

NEUROLOGIE

# Autobahn für nachwachsende Hirnzellen

Im Gehirn von Erwachsenen verwandeln sich neuronale Stammzellen in reife Neuronen, während sie von den seitlichen Hirnkammern (bläulich) an röhrenförmigen Fortsätzen entlang im rostralen migratorischen Strom (orange) zu den Riechkolben wandern.

JONATHAN WESTIN, GÖTEBORG

Das menschliche Gehirn ist in vieler Hinsicht nach wie vor eine Terra incognita. Zahllose Wege auf seiner neurologischen wie anatomischen Landkarte sind noch nicht eingezeichnet. Auf einer »Expedition« in unser Denkorgan haben Wissenschaftler aus Schweden und Neuseeland nun gleich zwei Entdeckungen gemacht. Zum einen fanden sie eine Struktur, die bisher nur bei Nagetieren bekannt war. Sie verbindet in jeder Hirnhälfte die subventrikuläre Zone, die an den Hirnkammern anliegt, mit dem Riechkolben im Vorderhirn. Zum anderen orteten die Forscher längs dieses s-förmigen Pfads, der bei Nagern RMS (rostraler migratorischer Strom) heißt, Nervenzellen in verschiedenen Entwicklungsstadien.

Aus Tierversuchen war bereits bekannt, dass sich an der subventrikulären Zone neuronale Stammzellen auf den Weg machen und sich zu reifen Neuronen ausdifferenzieren, während sie am RMS entlangwandern. Das Gleiche beobachtete das schwedisch-neuseeländische Team unter Peter S. Eriksson aus Göteborg und Richard L. M. Faull von der Universität Auckland nun auch bei sechs menschlichen Versuchspersonen mittels Magnetresonanztomografie. Zuvor hatten die Forscher die 17 Millimeter lange Struktur in den Gehirnen von dreißig Verstorbenen elektronenmikroskopisch identifiziert. Dieser Fund ist ein weiterer Beleg dafür, dass sich auch im Gehirn erwachsener Menschen Nervenzellen neu bilden können – was noch bis Ende der 1990er Jahre höchst umstritten war.

*Science, 2. 3. 2007, S. 1243*

SKELETT: CLAY BRYCE, WESTERN AUSTRALIAN MUSEUM; REKONSTRUKTION: WESTERN AUSTRALIAN MUSEUM

PALÄONTOLOGIE

# Reiche Funde aus Vorzeit-Falle

Was vielen Bewohnern Südwestaustraliens vor 100 000 bis 270 000 Jahren zum Verhängnis wurde, erwies sich für Paläontologen nun als seltener Glücksfall: In drei Karsthöhlen im trockenen Buschland der Nullarbor-Ebene entdeckten Gavin Prideaux und seine Kollegen vom Western Australian Museum in Perth die Überreste verschiedenster Tiere, die dort im Niemandsland auf halbem Weg zwischen Adelaide und Perth einst durch ein Loch im Kammerdach hineingestürzt und verendet waren. Damit eröffnete sich ein unerwarteter Blick auf eine überraschend reiche Fauna in einer heute öden und verlassenen Steppenregion, aus der es bisher kaum Fossilien gab.

**Nach dem Skelett eines in den Thylacoleo-Höhlen gefundenen Beutellöwen (oben) ließ sich diese Rekonstruktion (unten) des ausgestorbenen Raubtiers anfertigen.**

Insgesamt siebzig verschiedene Spezies entdeckten die Paläontologen bei ihren Ausgrabungen – darunter einen Riesenwombat und einen Beutellöwen (Bild links). Von den 23 gefundenen Känguruarten waren acht bisher unbekannt – darunter zwei Baumkängurus. Daraus und aus der Tatsache, dass die in den Höhlen verendeten Tiere überwiegend Pflanzenfresser waren, schließen die Forscher auf eine einstmals üppigere Vegetation, obwohl das Klima ähnlich trocken wie heute war.

Insgesamt 21 der entdeckten Arten sind mittlerweile ausgestorben. Ursache war laut Prideaux wohl die Versteppung durch zunehmende Flächenbrände, ausgelöst vom Menschen, der den Kontinent vor etwa 40 000 Jahren besiedelte.

*Nature, 25. 1. 2007, S. 445*

MEDIZIN

# Uralter menschlicher Untermieter

ZACPAC, ABBOTT, ALTANA

**Von Anfang an lag es dem Menschen im Magen: das Bakterium *Helicobacter pylori*.**

■ Seit fast 60 000 Jahren ist es dem Menschen ein treuer, aber missliebiger Begleiter: das Bakterium *Helicobacter pylori*. Etwa jeder Zweite von uns trägt es im Magen, wo es Entzündungen und Geschwüre hervorruft. Schon bevor unsere Ahnen aus ihrer Ursprungsregion in Ostafrika in alle Welt ausschwärmten, dürfte ihnen die haken- bis schraubenförmige Mikrobe Bauchgrimmen verursacht haben. Anschließend trug *Homo sapiens* den Plagegeist in jeden Winkel der Erde. Zu diesem Ergebnis kommt ein internationales Team um Mark Achtman vom Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie in Berlin.

Die Forscher verglichen die Variabilität im Erbgut diverser Bevölkerungsgruppen weltweit mit derjenigen im Genom von Populationen des Magenbakteriums. Dabei entdeckten sie eine erstaunliche Parallele: Bei beiden Spezies nimmt mit zunehmender geografischer Distanz von Ostafrika die genetische Variabilität ab. Das beweist ihren gemeinsamen Ursprung auf dem Schwarzen Kontinent. Denn in diesem Fall sind Populationen in anderen Erdteilen umso später entstanden, je weiter sich ihre Gründer von Afrika entfernt hatten. In der kürzeren Zeit seither konnten sich dann weniger Mutationen in ihnen anhäufen.

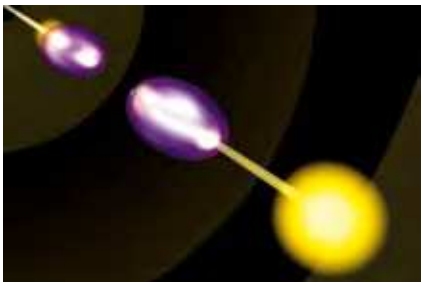
*Nature, 22. 2. 2007, S. 915*

QUANTENPHYSIK

# Erstmals Licht gebeamt

■ Die Teleportation von Teilchen – genauer: das Erstellen einer Kopie an einem anderen Ort – ist inzwischen fast schon Routine. Nun haben Lene Vestergaard Hau von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) und ihre Kollegen den gleichen Trick erstmals auch mit Licht geschafft. Der Forschergruppe war es in den vergangenen Jahren bereits gelungen, elektromagnetische Strahlung vorübergehend anzuhalten. Dabei ließ das Team einen Laserpuls in einem so genannten Bose-Einstein-Kondensat verschwinden. In dieser extrem kalten Ansammlung von Gasatomen, die ihre Individualität eingebüßt haben und wie ein gleichgeschaltetes Kollektiv agieren, übernahmen Elektronenspins die im Lichtstrahl enthaltenen quantenmechanischen Informationen, sodass diese nicht verloren gingen. Wurden sie später wieder abgerufen, erstand der Laserpuls neu und setzte seine Reise fort. Im jetzigen Experiment übertrug Haus Team die in den Spins gespeicherte Information auf ein anderes, mehr als ein zehntel Millimeter entferntes Bose-Einstein-Kondensat, bevor es den Lichtstrahl wieder freisetzte. Für die Übertragung dienten Atome als Boten.

Der aus dem zweiten Kondensat wiedererweckte Laserpuls stimmte in seinen quantenmechanischen Eigenschaften völlig mit dem ursprünglichen überein; nur die Intensität war auf ein Fünfzigstel gesunken. Die Teleportation von Licht hat potenzielle Bedeutung für Quantencomputer. *Nature, Bd. 8. 2. 2007, S. 623*



SEAN R. GARNER, HARVARD UNIVERSITY

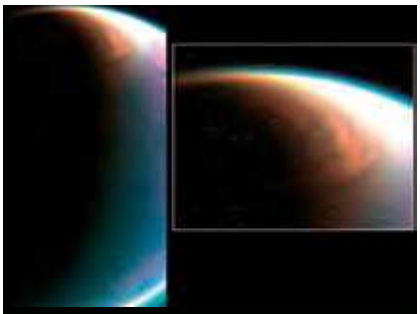
**Ein Laserpuls verschwindet in einem Bose-Einstein-Kondensat (violett) und taucht aus einem anderen wieder auf.**

PLANETOLOGIE

# Heiter bis wolkig auf Titan

■ Der Saturnmond Titan gleicht in manchem der Erde: Er ist fast genauso groß, und seine dichte Atmosphäre besteht gleichfalls hauptsächlich aus Stickstoff. Auch einen Wetterkreislauf ähnlich dem irdischen vermuteten die Astronomen dort seit Langem, wobei wegen der sehr viel tieferen Temperaturen allerdings Methan die Rolle des Wassers übernähme. Es liegt bei –182 bis –162 Grad Celsius als Flüssigkeit vor, die verdampfen und Wolken bilden könnte, aus denen der Kohlenwasserstoff schließlich wieder abregnet. Als erste Bestätigung dafür wurden kürzlich in der Tat Seen aus flüssigem Methan auf der Nordhalbkugel Titans entdeckt.

Nun hat die Raumsonde Cassini zudem einen riesigen Wolkenwirbel über dem Nordpol des Saturnmonds fotografiert. Er enthält neben Methan auch Ethan sowie andere organische Verbindungen und ist mit einem Durchmesser von 2400 Kilometern halb so groß wie die USA.



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

**Auf jüngsten Aufnahmen der Raumsonde Cassini erscheint ein riesiger Wolkenwirbel über dem Nordpol des Saturnmonds Titan.**

Ein Titanjahr dauert knapp dreißig Erdjahre. Derzeit hat dort gerade der Frühling begonnen. Nach Computersimulationen mit Klimamodellen sollte sich die beobachtete Wolke samt Regen und Methanseen im Verlauf des Titanjahrs nach Süden verlagern und dann auflösen. Nach einer fast wolkenfreien Zeit von vier bis fünf Erdjahren begänne der Kreislauf von vorn. Ob sich die Vorhersagen bestätigen, lässt sich mit Cassini direkt verfolgen, da die Sonde allein 2007 noch 16-mal dicht an Titan vorbeifliegt.

*Pressemitteilung der Esa vom 1. 2. 2007*

**Mitarbeit:** S. Hügler, A. Römer und I. Wahl

NASA, JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

# Saturn von oben

»Es ist so atemberaubend, dass es einem fast schwindelt«, schwärmte Carolyn Porco vom Institut für Weltraumforschung in Boulder (Colorado) über diese nie zuvor gesehene Ansicht des Ringsystems von Saturn aus einem Winkel von etwa vierzig Grad oberhalb der Äquatorebene. Aufgenommen hat das Mosaik aus zwölf echtfarbigen Einzelbildern die Raumsonde Cassini, die den Planeten derzeit auf wechselnden Bahnen umkreist. Die Belichtung wurde auf optimalen Kontrast für die Ringe eingestellt, sodass die Tagseite Saturns überbelichtet und die Nachtseite fast schwarz ist. Nur in der schmalen Zwielichtzone dazwischen blitzen die natürlichen Farben auf. Die Wirkung des Bildes beruht auch auf dem imposanten Schattenriss der Ringe auf Saturns Tagseite und dessen eigenem Schattenkegel.

MEDIZIN

# Xenon im Käfig für die Krebsdiagnose

**Im Modellversuch ist es erstmals gelungen, molekulare Vorgänge auf der Ebene einzelner Zellen direkt sichtbar zu machen. Das Verfahren, das Biosensoren mit eingeschlossenem Xenon benutzt, könnte dereinst zur Frühdiagnose von Krebs oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen dienen.**

Von Leif Schröder

Computer- und Magnetresonanztomografie (CT und MRT) liefern heute schon detaillierte Einblicke in den menschlichen Körper. Insbesondere die MRT geht dabei über die rein anatomische Darstellung hinaus und erlaubt es, auch physiologische Vorgänge wie die Durchblutung oder Gewebeelastizität bis hin zur Aktivierung einzelner Gehirnareale visuell darzustellen.

Im nächsten Schritt, an dem Wissenschaftler derzeit intensiv arbeiten, geht es nun darum, auch biologische Prozesse auf zellulärer Ebene direkt sichtbar zu machen. Dazu dienen molekulare Marker, die biochemische Veränderungen in einer Weise anzeigen, dass man sie letztlich mit dem Auge beobachten kann. Ziel ist es, Erkrankungen schon im frühestmöglichen Stadium zu erkennen und eine maßgeschneiderte Therapie zu entwickeln. Auch ließe sich so auf biochemischer Ebene äußerst verlässlich verfolgen, wie der Patient auf die Behandlung anspricht.

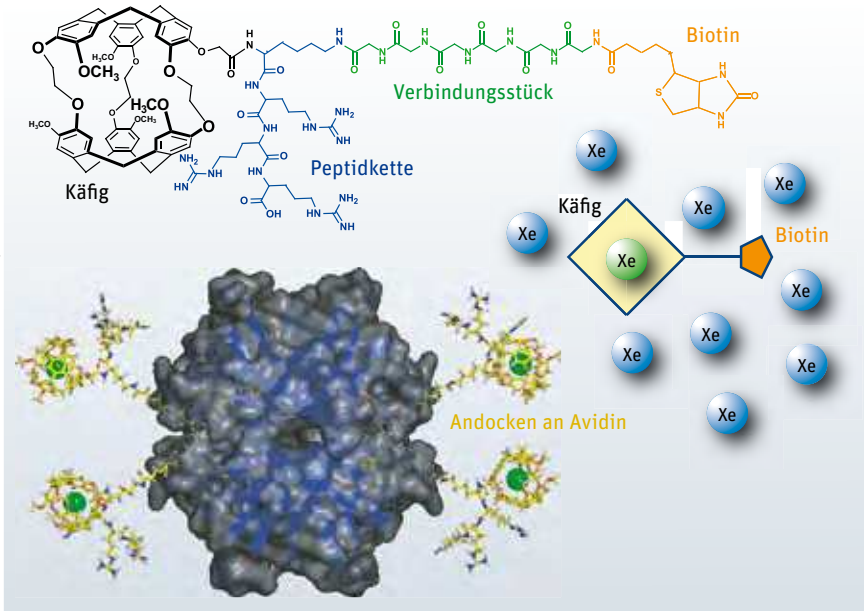
Da die MRT räumlich hoch aufgelöste Aufnahmen liefert und mit harmlosen Radiowellen arbeitet, würden die Mediziner sie gerne auch für die molekulare Bildgebung heranziehen. Bisher störte dabei allerdings die sehr geringe Empfindlichkeit dieser Messmethode. Bei der MRT bringt ein Radiopuls Kernspins – eine Art Drall bestimmter Atomkerne, mit dem ein magnetisches Moment verbunden ist – in einem Magnetfeld zum Umklappen, wodurch die Teilchen auf ein höheres Energieniveau angehoben werden. Dann misst ein Detektor die Radiostrahlung, die sie bei der Rückkehr in den Ausgangszustand aussenden.

## Problem zu schwacher Signale

Die Intensität dieses Signals hängt stark vom Unterschied in der Anzahl der Spins auf den beiden Niveaus ab. Wegen der sehr geringen Energiedifferenz ist der untere Zustand normalerweise aber kaum stärker besetzt als der obere. Dadurch trägt bei klinischen MRT-Geräten nur etwa jeder millionste Kern zum Signal bei. Infolgedessen lassen sich ausschließlich Substanzen sichtbar machen, die in hoher Konzentration im Körper vorliegen. Das gilt vor allem für Wasser, die Quelle fast aller klinischen MRT-Bilder. Allerdings kann dieses allgegenwärtige Molekül nur in den seltensten Fällen auch biochemische Veränderungen anzeigen.

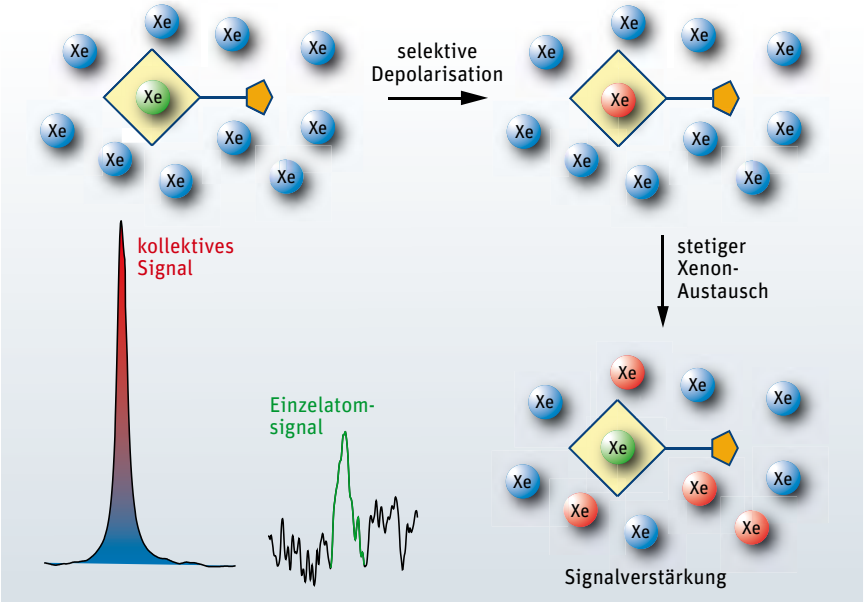
Es gibt jedoch Lösungsansätze für das Problem. Viel versprechend erscheint dabei kurioserweise ein Atom, das in biologischen Proben gar nicht vorkommt: Xenon. Das Isotop Xe-129 hat die besondere Eigenschaft, dass sich bei ihm der Unterschied in der Besetzungszahl der beiden Energieniveaus durch Wechselwirkung mit Rubidiumatomen künstlich 10 000-fach steigern lässt – ein Vorgang, der als Hyperpolarisation bezeichnet wird. Die Folge ist ein äußerst starkes Signal, das auch bei geringer Konzentration dieses Elements messbar bleibt. Hyperpolarisierte Edelgase können entweder – was heute schon bei der Magnetresonanztomografie der Lunge mit Helium geschieht – direkt vom Patienten eingeatmet oder in Lipid-Emulsionen gelöst und dann injiziert werden.

Wie aber lässt sich die molekulare Information auf Xenon übertragen? Eine Forschergruppe um Alexander Pines und David Wemmer von der Universität von Kalifornien in Berkeley und vom Law-




ABBILDUNGEN DIESER DOPPELSEITE: ALEXANDER PINES UND DAVID WEMMER, UNIVERSITY OF CALIFORNIA BERKLEY

**Im Modellversuch ließ sich das Protein Avidin mit einem Sensor aufspüren, in dem ein molekularer Käfig für Xenon (Xe) mit dem Molekül Biotin verbunden ist, das sich spezifisch an bestimmte Oberflächenstrukturen des Avidins anlagert. Durch diese Anlagerung ändert sich das Magnetresonanz-Signal des eingesperrten Xenonkerns.**




**Die Magnetresonanz von Xenon lässt sich durch »Hyperpolarisation« erheblich steigern. Dennoch ist das Signal eines einzelnen Xenonatoms im Käfig (grün) zu schwach, um sich klar gegen das Hintergrundrauschen abzuheben. Mit dem neuen Hyper-Cest-Verfahren lässt es sich jedoch verstärken. Dabei wird ausgenutzt, dass der Käfig porös ist, weshalb ein stetiger Austausch von Xenonatomen stattfindet. Hebt man nun mit einem Radiopuls gezielt die Hyperpolarisation der Gefängnisbesucher auf, sammeln sich Tausende depolarisierter Xenonatome (rot) in der Umgebung des Käfigs an. Sie bewirken eine gut messbare Schwächung der lokalen Magnetresonanz gegenüber dem Rest der Probe.**

rence-Berkeley-Nationallaboratorium, der ich angehöre, sperrt das Atom dazu in einen molekularen Käfig. An diesen ist die eigentliche Sonde gekettet: ein organisches Molekül, das nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip mit einer Zielstruktur wechselwirken kann. In den bisherigen Experimenten ging es uns darum, den Beweis zu liefern, dass die Methode funktioniert. Dabei diente das Molekül Biotin als Sonde zum spezifischen Aufspüren des Proteins Avidin.

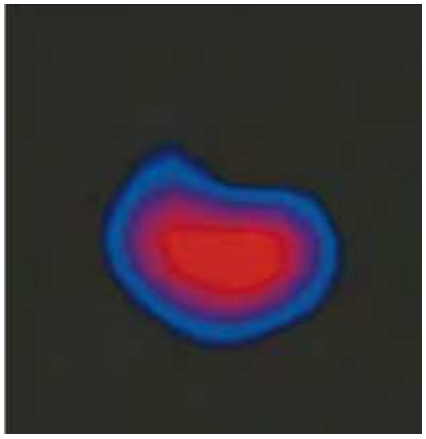
Entscheidend ist, dass das vom Xenon ausgehende Signal sehr stark von der molekularen Umgebung beeinflusst wird, obwohl das Edelgas selbst weder eine chemische Bindung mit dem Käfig noch gar mit dem Zielmolekül eingeht. Die Atome in seiner Nachbarschaft schirmen jedoch das Magnetfeld ab. Dadurch beeinflussen sie den Abstand zwischen den beiden Spin-Niveaus und damit die Energie für den Übergang zwischen ihnen. Folglich ändert sich die Frequenz des Radiosignals. Somit können die Forscher nicht nur unterscheiden, ob ein Xenonatom im Käfig eines Sensors sitzt, sondern auch, ob dieser Sensor sich gerade an sein Zielmolekül – in diesem Fall das Avidin – angelagert hat. Prinzipiell lassen sich auf diese Weise maßgeschneiderte Sonden für alle biologisch wichtigen Moleküle herstellen, für die ein Antikörper oder anderer spezifischer Andockpartner bekannt ist.

Die Hyperpolarisation des Xenons allein reicht allerdings noch nicht aus, um die räumliche Verteilung eines bestimmten Moleküls mit der MRT empfindlich genug darzustellen. Weil jeder Käfig nur ein einziges Edelgasatom aufnimmt, bleibt die Konzentration der eingefangenen Teilchen in der biologischen Probe so gering, dass die Aufnahme eines Bildes mehrere Wochen dauern würde. Unser Berkeley-Team hat jedoch einen Trick gefunden, dieses Problem zu umgehen. Paradoxerweise steigern wir dabei die Empfindlichkeit dadurch, dass wir das Signal gezielt auslöschen.

Wie funktioniert das? In der geschilderten Situation befinden sich die allermeisten Xenonatome außerhalb der molekularen Käfige und bleiben damit nutzlos. Könnte man sie einbeziehen, fiele das Signal deutlich stärker aus. Das haben wir nun geschafft, indem wir ausnutzten, dass der Käfig nicht wirklich dicht ist, sondern jedes Xenonatom nur für kurze Zeit festhält. Nachdem es freigekommen ist, gerät ein anderes ins Gefängnis. So findet ein reger Austausch zwischen innen und außen statt.

## Stempel für Käfigbesucher

Da sich die Anregungsfrequenz für die Kerne im Käfig von der für freies Xenon unterscheidet, lässt sich den kurzzeitig gefangenen Edelgasatomen gleichsam ein Stempel aufdrücken, der erhalten bleibt, nachdem sie wieder entkommen sind. Dies geschieht durch einen Radiopuls, der ihre Polarisation aufhebt und damit bewirkt, dass sie nichts mehr zum MRT-Signal beitragen. Dauert solch ein Puls einige Sekunden an, so sind in dieser Zeit Tausende von Xenonatomen im ▷



**In einer herkömmlichen Magnetresonanzaufnahme (links) ist der mit Avidin beschichtete Bereich (+) nicht erkennbar. Dagegen leuchtet er beim Hyper-Cest-Verfahren deutlich auf (farbcodiertes Bild, rechts).**

▷ Käfig gewesen und depolarisiert worden. Sie sammeln sich in der Umgebung an. Auf einer MRT-Aufnahme erscheint diese Region deshalb dunkler als auf einem vorher angefertigten Bild. Bildet man die Differenz aus beiden Datensätzen, so leuchtet nur die Region mit den vorher »markierten« Atomen auf. Indem wir die Frequenz des Auslöschungspulses so wählten, dass ausschließlich Xenonatome depolarisiert wurden, die in einem Käfig saßen, dessen Biotin-Sonde an ein Avidin gebunden war, konnten wir diese Bindung sichtbar machen.

Nach der erfolgreichen Demonstration der molekularen Bildgebung mit Xenon-Biosensoren im Modellversuch hoffen wir, bald auch erste Anwendungen dieses Hyper-Cest genannten Verfahrens (nach englisch *chemical exchange saturation transfer*) mit biomedizinischen Fragestellungen realisieren zu können. So wollen wir mittels eines hyperpolarisierten Xenon-Biosensors Krebszellen aufspüren, die ein charakteristisches Protein auf ihrer Membran tragen.

Vorderhand planen wir die entsprechenden Versuche in Modell-Lösungen. Langfristiges Ziel aber bleibt ein biomedizinisches Verfahren zur frühzeitigen Diagnose von Tumoren oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Auch wenn der Weg bis dahin noch lang sein dürfte, stimmt uns zuversichtlich, dass die Forschung im Bereich der Magnetresonanz bisher schon viele schwierige Hürden genommen hat.

**Leif Schröder** hat 2003 an der Universität Heidelberg in Physik promoviert und arbeitet derzeit als Emmy-Noether-Stipendiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft in Berkeley.

MOLEKULARBIOLOGIE

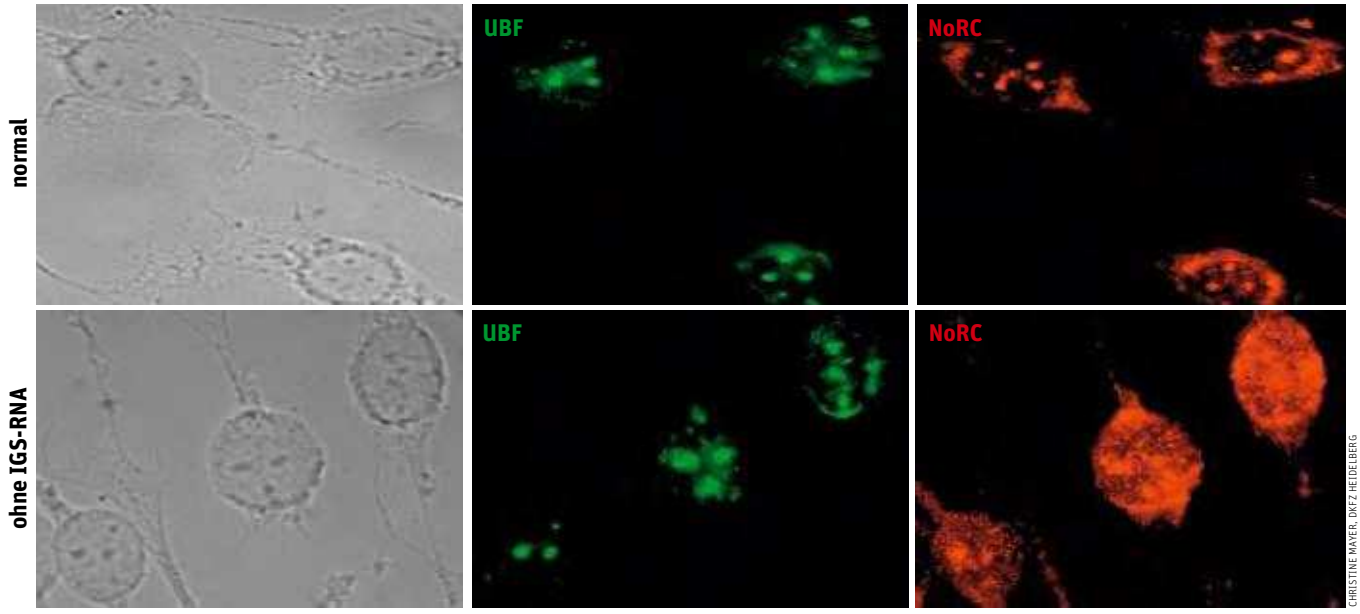
# Von wegen Müll!

**Von den meisten Forschern bislang als nutzloses Abfallprodukt verkannt, entpuppt sich die nichtcodierende RNA immer mehr als Drahtzieher bei der Genregulation.**

Von Stefanie Reinberger

Über viele Jahrzehnte war die Ribonukleinsäure, die RNA, in den Köpfen der Molekularbiologen nur eines: ein schlichter Handlanger, der als DNA-Blaupause die Übersetzung der Erbinformation in Proteine unterstützt. Kurze RNA-Schnipsel oder Abschriften aus Genomabschnitten, in denen keine Eiweißmoleküle verschlüsselt sind, galten als bloße Abfallprodukte – und das, obwohl sie nach aktuellen Schätzungen zwischen 50 und 95 Prozent aller Ribonukleinsäuren einer Zelle ausmachen. In den letzten Jahren mehren sich jedoch die Hinweise darauf, dass die nichtcodierende RNA eine wichtige Rolle bei der Genregulation spielt. Zum Beispiel hilft sie entscheidend mit, bei Frauen eines der beiden Geschlechtschromosomen stillzulegen.

Ingrid Grummt, Leiterin der Abteilung Molekularbiologie der Zelle II ▷




**Normalerweise binden sich in einer Zelle die beiden Proteine NoRC und UBF an die Kernkörperchen, die in der mikroskopischen Aufnahme (links) als dunkle Punkte zu erkennen sind. Wird jedoch die so genannte IGS-RNA abgefangen, verteilt sich das NoRC – nicht dagegen das UBF – auf den gesamten Zellkern.**

▷ am Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) in Heidelberg, hat gemeinsam mit ihren Mitarbeiterinnen Christine Mayer und Raffaella Santoro jetzt eine weitere bedeutende Kontrollfunktion der Ribonukleinsäure identifiziert. Demnach entscheiden nichtcodierende RNAs darüber, in welchem Umfang eine Zelle überhaupt neue Proteine produzieren kann *(Molecular Cell, Bd. 22, S. 351)*.

Ausgangspunkt dieser Entdeckung war jene Ribonukleinsäure, die im Verbund mit einigen Eiweißmolekülen die Ribosomen bildet, an denen die Eiweißsynthese stattfindet. Die genetische Information für diese so genannte rRNA liegt in der rDNA verschlüsselt und findet sich gleich mehrfach im Genom – in annähernd 400 Exemplaren, die fein säuberlich durch nichtcodierende Platzhalter (IGS, nach englisch *Intergenic Spacer*) getrennt sind. Allerdings ist in jeder Zelle immer nur etwa die Hälfte davon aktiv. Der Rest liegt dicht verpackt vor – in Form von so genanntem Heterochromatin, das im Gegensatz zum locker gewickelten Euchromatin nicht abgelesen werden kann.

Zuständig für die Verpackung und Stilllegung der rDNA ist ein Proteinkomplex namens NoRC *(nucleolar remodeling complex)*. Bevor er tätig werden kann, muss er allerdings seinen Einsatzort finden. Wie gelingt ihm das? Christine Mayer, die schon als Studentin von der RNA fasziniert war und ihr seither ihre Forschungsarbeit widmet, hatte gleich den Verdacht, dass ihr Lieblingsmolekül dabei mitmischt. Im einem ersten, groben Test behandelte sie deshalb Kulturzellen kurzerhand mit einem Enzym, das RNAs zerstört. Das Ergebnis dieses Rundumschlags bestätigte ihre Vermutung: Zuvor an rDNA gebundenes NoRC hatte sich nach der Behandlung abgelöst. Als »Kitt« zwischen beiden musste also eine Ribonukleinsäure fungieren.

## Fahndung nach dem RNA-Kleber

Nun begann für das Team am DKFZ der mühselige Teil der Arbeit: Es galt den RNA-Kleber zu identifizieren und genauer zu charakterisieren. Dafür bedienten sich die Forscherinnen eines erprobten Tricks. Sie benutzten das NoRC-Protein als Angelhaken, um damit den passenden RNA-Bindungspartner aus dem bunten Mischmasch zellulärer RNAs herauszufischen. Doch der Trick versagte. »In der hohen Konzentration, in der Proteine bei solchen Tests eingesetzt werden, verband sich NoRC plötzlich mit jeglicher Form von RNA«, erzählt Mayer. »Mit diesem Ergebnis konnten wir natürlich überhaupt nichts anfangen.«

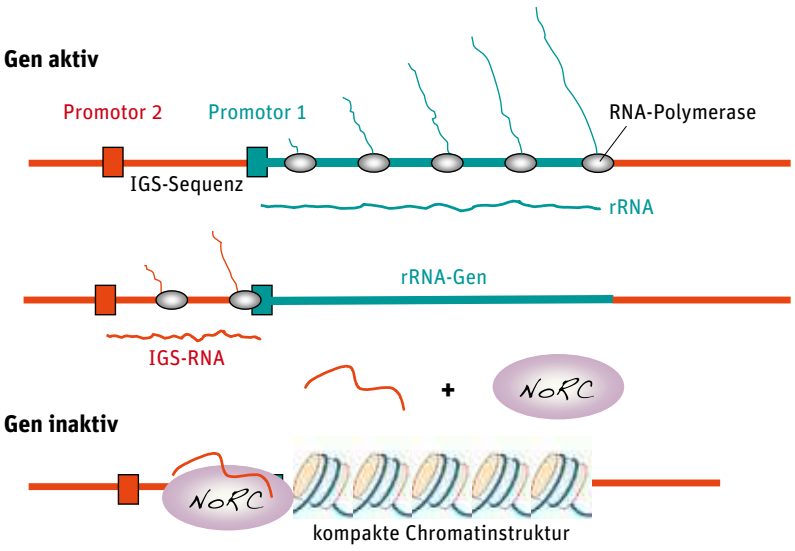
So schnell gab sich die junge Wissenschaftlerin allerdings nicht geschlagen. Sie setzte die Suche gezielter fort. »Es ist schon lange bekannt, dass rRNA in den Nukleoli, den Kernkörperchen, gebildet wird«, erläutert sie das Vorgehen. »Folglich sollte sich auch die Regulation der rDNA-Aktivität dort abspielen.« Deshalb konzentrierte das Team seine Fahndung auf diesen besonderen Bereich des Zellkerns. Dazu erzeugte es kurze RNA-Abschriften jener Erbsubstanz, die sich dort befindet. In diesem sehr viel kleineren Pool fischte es dann wiederum mit dem NoRC-Angelhaken.

Diesmal hatten die Forscherinnen Erfolg: Von allen Abschriften blieb nur eine haften. Sie stammte noch dazu aus den IGS-Regionen, also den Platzhaltern zwischen den rDNA-Abschnitten. Aber fungierte sie wirklich als Regulator? Um das zu prüfen, schaltete Mayer diesmal gezielt nur diese Ribonukleinsäure aus. Das Ergebnis war überzeugend: In den behandelten Zellkulturen hatten sich wiederum die NoRC-Moleküle vom Erbgut abgelöst. Zugleich lagen sämtliche rDNA-Bereiche in der locker gewickelten, aktiven Form vor, und es wurde doppelt so viel rRNA produziert wie normal. Durch den Mangel an IGS-RNA hatten die bislang verpackten und damit stillgelegten DNA-Abschnitte somit die Arbeit aufgenommen.

»Damit haben wir einen weiteren wichtigen Beleg dafür gefunden, dass RNA regulierend in die Umsetzung der genetischen Information eingreift«, erklärt Mayer. Zwar sind auch andere Beispiele für eine solche Steuerung durch nichtcodierende Ribonukleinsäuren bekannt, doch das Heidelberger Team hat erstmals einen Einblick in die zu Grunde liegenden Mechanismen gewonnen – auch wenn es sicher noch viele Rätsel zu knacken gibt, bis die Arbeitsweise der IGS-RNA und anderer vermeintlich unnützer Ribonukleinsäuren endgültig geklärt ist.

Die weiteren Untersuchungen versprechen spannend zu werden, denn die DKFZ-Wissenschaftlerin hält es für möglich, dass die RNA bei der Genregulation sogar die Hauptrolle spielt und die Proteine nur für die grundlegende Struktur und Funktion der Zelle zuständig sind. Das würde das molekularbiologische Weltbild auf den Kopf stellen. Die überzeugte RNA-Forscherin Mayer freut sich aber nicht nur auf die Aussicht, vielleicht einen kompletten Wissenschaftszweig zu revolutionieren, wie sie lachend zugibt: »Es verschafft mir auch so etwas wie eine persönliche Genugtuung, mit der Arbeit unseres Teams zeigen zu können, dass die RNA alles andere ist als nur die langweilige Abschrift der DNA.«

**Ein aktives rRNA-Gen wird, beginnend am Promotor 1, von einer RNA-Polymerase abgelesen. Setzt die Polymerase dagegen am Promotor 2 an, entsteht eine so genannte IGS-RNA. Diese sorgt dafür, dass sich das Protein NoRC kurz vor dem Promotor 1 anlagert und das rRNA-Gen inaktiviert, indem es den DNA-Strang in eine kompakte, verknäulte Form bringt.**



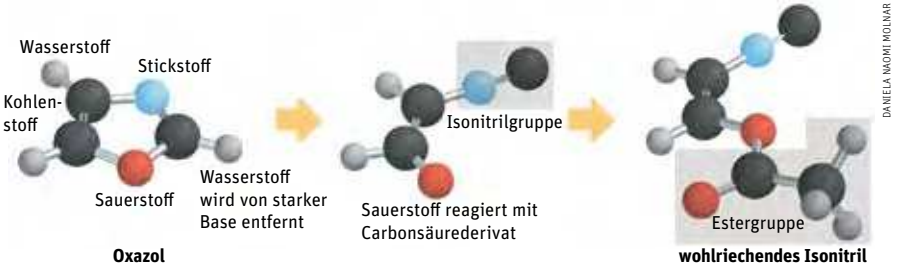

CHRISTINE MAYER, DKFZ HEIDELBERG

**Stefanie Reinberger** ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

# Parfümierte Stinker

**Nützlichen Chemikalien, die wegen ihres widerlichen Geruchs kaum eingesetzt wurden, konnten Forscher nun eine angenehme Duftnote verpassen.**

Von Steven Ashley




DANIELA NAOMI MOLNAR

**Bei einem neuen Verfahren zur Synthese wohlriechender Isonitrile wird zunächst mit einer starken Base ein Proton von einer zyklischen organischen Verbindung namens Oxazol entfernt. Dabei öffnet sich der Ring zu einem linearen Molekül, das am einen Ende eine Isonitrilgruppe und am anderen ein negativ geladenes Sauerstoffatom enthält. Dieses bildet mit einem Carbonsäurederivat eine Estergruppe, der das so erzeugte Isonitril womöglich seinen angenehmen Duft verdankt.**

Was stinkt am schlimmsten? Verdorbener Fisch? Abgase von Kläranlagen? Schweißfüße? Organische Chemiker kennen eine Klasse von Substanzen, die noch widerlicher riechen: die Isonitrile. Sie enthalten eine über Stickstoff gebundene Cyanogruppe (C≡N–) und leiten sich von der hochgiftigen Blausäure ab. »Da dreht sich einem augenblicklich der Magen um«, meint Luca Turin, ein sehr bekannter, wenn auch umstrittener Geruchsforscher, den Chandler Burr 2003 in seinem Buch »Emperor of Scent« (etwa »Herr der Düfte«) porträtiert hat.

Hinzu kommt, dass die gebräuchliche Methode zur Herstellung von Isonitrilen mit Phosgen arbeitet, einem berüchtigten Kampfgas (»Grünkreuz«) aus dem Ersten Weltkrieg. Kein Wunder also, wenn viele Forscher diese Verbindungen, die noch dazu wenig stabil sind, scheuen wie der Teufel das Weihwasser. Dabei haben Isonitrile erwiesenermaßen viele nützliche Eigenschaften und taugen insbesondere als Ausgangsstoffe für Arzneimittel und Polymere.

Die Situation könnte sich jedoch bald ändern. Zwei Wissenschaftler an der Universität von Kalifornien in Riverside haben jetzt wohlriechende Isonitrile synthetisiert, die ihren stinkenden Verwandten nicht nur in nichts nachstehen, sondern auch problemloser herstellbar sind. Die Duftnote reiche von Soja, Malz und altem Holz über Kirsch bis Toffee, berichteten der Chemiker Michael C. Pirrung und sein Doktorand Subir Ghorai kürzlich im »Journal of the American Chemical Society« *(Bd. 128, S. 11772)*. »Diese Substanzen sind so vielseitig und leicht zu erzeugen, dass sie meines Erachtens bald viele Anwendungen finden werden«, prophezeit Pirrung.

Warum eignen sich Isonitrile so gut als Ausgangsstoffe für Synthesen? Den Grund erklärt Bruce Ganem von der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York) so: »Die Verbindungen sind für organische Chemiker interessant, weil sie drei oder vier weitere funktionelle Gruppen – also Atomverbände mit charakteristischer Reaktivität – zusammenbringen können.« Die meisten anderen Substanzen, die sich für ähnliche Zwecke eignen, verknüpfen nur zwei Reaktionspartner auf einmal.

Die seltene Fähigkeit der Isonitrile ist, wie Ganem betont, besonders in der kombinatorischen Chemie von Vorteil, wo es um die Suche nach neuen Medikamenten geht. Dabei werden mit einfachen, schnellen Verfahren unzählige verschiedene Verbindungen erzeugt – als Ausgleich für die verschwindend geringe Wahrscheinlichkeit, per Zufall einen nützlichen Wirkstoff zu finden. »Die Forscher kombinieren auf systematische Art Varianten diverser Ausgangsstoffe und produzieren so riesige Substanz-Bibliotheken, die sie dann mit einfachen Screening-Methoden auf ihre Wirksamkeit gegen bestimmte Krankheiten testen«, erläutert Ganem.

## Nützliche Eintopf-Reaktionen

Ideal für diesen Zweck wäre ein Verfahren, bei dem sich in einem Zug mehrere Ausgangsstoffe zu einem Produkt vereinigen, ohne dass irgendwelcher Abfall entsteht. Isonitrile ermöglichen solche Eintopf-Reaktionen: In ihrer Gegenwart braucht man nur die Ausgangssubstanzen zusammenzukippen, und schon laufen wie von Geisterhand die erforderlichen Reaktionen in der richtigen Reihenfolge ab. »Wie bei fallenden Dominosteinen«, sagt Ganem, »setzt das Isonitril zuerst eine funktionelle Gruppe in Komponente A frei, die daraufhin mit Komponente B reagiert, wo sie die nächste funktionelle Gruppe ins Spiel bringt, und so weiter. Genau im richtigen Moment kommt so jeder Baustein an die Reihe.«

Isonitrile ermöglichen insbesondere zwei wohlbekannte organische Umsetzungen: die Passerini- und die Ugi-Reaktion. Beide liefern peptidartige Moleküle mit Bindungen, die denen von Eiweißstoffen gleichen. Die Reaktionsprodukte können folglich vielfach die Funktionen natürlicher Peptide nachahmen.

Pirrung und Ghorai sind auf die wohlriechenden Isonitrile gestoßen, als sie nach einer Alternative zur Herstellung der herkömmlichen Stinker mit Phosgen suchten. Dabei kamen sie auf die Idee, es mit Oxazol oder Benzoxazol zu versuchen – zwei Substanzen, die erst neuerdings leicht zugänglich sind. Es handelt sich um zyklische Verbindungen – genauer: Heteroaromaten – mit einem Stickstoff- und einem Sauerstoffatom innerhalb eines Fünfrings. Am Kohlenstoffatom dazwischen sitzt ein Wasserstoff, der sich viel einfacher als die anderen entfernen lässt. Allerdings braucht man dafür sehr starke organische Basen, wie sie die frühen Isonitril-Forscher noch nicht kannten. Beim Entfernen des Wasserstoff- ▷

▷ atoms öffnet sich der Ring zu einem gestreckten Molekül, das am einen Ende die gewünschte Cyano- und am anderen eine alkoholische Gruppe trägt. Letztere bildet mit Carbonsäuren einen Ester.

»Nachdem mein Doktorand auf diese Weise mehrere Isonitrile hergestellt hatte, fragte ich ihn, wie sie denn röchen«, erinnert sich Pirrung. »Als er nichts Negatives zu berichten wusste, war meine Neugier geweckt.« Die beiden Forscher stellten also weitere Isonitrile mit der neuen Methode her und ließen deren Geruch von einem Ad-hoc-Gremium aus Pirrungs Studenten bewerten. Das Ergebnis war eine breite Palette von durchweg relativ angenehmen Düften.

Es liegt nahe, den Grund dafür in der Estergruppe zu vermuten, dem charakteristischen Element einer Stoffklasse, die Früchten und Blumen ihren angenehmen Geschmack oder Duft verleiht. Dagegen spricht allerdings, dass ein schon früher entdecktes Isonitril mit Estergruppe so übel riecht wie alle anderen herkömmlichen Vertreter dieser Substanzgruppe. Die Frage nach der Ursache des angenehmen Dufts bleibt also vorerst offen. »Dass man Isonitrile parfümieren kann, hat mich vom Stuhl gehauen«, bekennt Ganem. »Dieser Trick sollte uns eine Latte von nützlichen Reaktionspartnern für die kombinatorische Chemie bescheren, die nicht nur die Fantasie der Pharmaforscher beflügeln dürfte.« Nach Jahrzehnten auf dem geruchlichen Abstellgleis könnten Isonitrile also endlich ihr enormes Potenzial als Werkzeuge in der organischen Chemie entfalten.

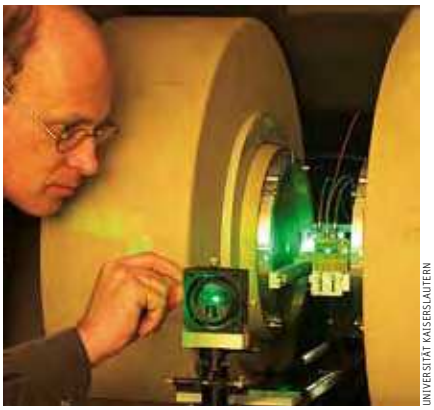
**Steven Ashley** ist Redakteur bei Scientific American.

QUANTENPHYSIK

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

# Bose-Einstein-Kondensat bei Zimmertemperatur

**Der exotische quantenmechanische Zustand, in dem die Atome eines Gases zu einer Art Superatom verschmolzen sind, ließ sich bisher nur bei extrem tiefen Temperaturen erzeugen. Mit so genannten Quasiteilchen ist der Übergang jetzt erstmals auch ohne Kühlung gelungen.**



UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN

**Beim Experiment zur Erzeugung eines Bose-Einstein-Kondensats aus Magnonen justiert Alexander Serga von der Universität Kaiserslautern einen Laserstrahl, der auf die Probe gerichtet ist. Diese befindet sich zwischen den Spulen eines Elektromagneten und erscheint als kleiner schwarzer, horizontaler Streifen im Fokus des Laserstrahls. Die drei Zuleitungen übertragen Mikrowellen, die zur Erzeugung und Überprüfung des Bose-Einstein-Kondensats notwendig sind.**

Von Jürgen Brück

Im Physikunterricht in der Schule lernt man, dass Materie in der Regel einen von drei Aggregatzuständen annimmt: fest, flüssig oder gasförmig. Für den Alltagsgebrauch reicht das sicherlich. Wissenschaftler unterscheiden allerdings etliche weitere Materiezustände. Dazu zählt etwa das Plasma, ein Gemisch aus positiven Atomrümpfen und negativen Elektronen.

## Makroskopische Quantenobjekte

Die Schulphysik lehrt ferner, dass die Teilchen eines Gases idealerweise nur durch elastische Stöße miteinander wechselwirken. Sie verhalten sich dabei, grob betrachtet, wie punktförmige Billardkugeln, die aufeinanderprallen und dann in unterschiedliche Richtungen wieder auseinanderfliegen. In der Realität kommen zwar zusätzliche Faktoren ins Spiel – so die endliche Ausdehnung der Moleküle und ihre gegenseitige Anziehung. Das ändert jedoch nichts daran, dass sich die Atome in einem typischen Gas bei normalen Temperaturverhältnissen individuell verhalten und nicht etwa im Formationsflug umherschwirren.

Es gibt freilich eine bemerkenswerte Ausnahme. Schon 1924 gelangten Satyendra Nath Bose und Albert Einstein zu der theoretischen Erkenntnis, dass gewisse Teilchen unter bestimmten Umständen ihre Eigenständigkeit verlieren können. Oberhalb einer kritischen Dichte sollten sie, wenn ihre Energie übereinstimmt, einen gemeinsamen Quantenzustand annehmen. Damit werden sie ununterscheidbar und verhalten sich wie ein einziges Superatom.

Die Idee eines solchen Phasenübergangs faszinierte die Physiker von Beginn an; denn als makroskopisches Gebilde böte das Bose-Einstein-Kondensat ganz neue Möglichkeiten, die Quantennatur der Materie, die sonst nur an winzigen submikroskopischen Objekten zu Tage tritt, experimentell zu erforschen. Doch seine Herstellung erwies sich als extrem kompliziert und aufwändig. Damit sich genügend Atome im gleichen Energieniveau sammeln, muss das Gas nämlich bis fast auf den absoluten Nullpunkt heruntergekühlt werden. Erst im Jahr 1995 gelang das Eric A. Cornell und Carl Wieman an der Universität von Colorado in Boulder. Die beiden Forscher schufen als Erste ein gasförmiges Bose-Einstein-Kondensat – wofür sie 2001 den Physik-Nobelpreis erhielten.

Damit stand nun zwar ein makroskopisches Quantenobjekt zur Verfügung. Doch behinderten die nötigen extrem tiefen Temperaturen das Arbeiten damit. Deshalb bleibt es ein lohnendes Ziel, andere physikalische Systeme zu finden, bei denen die Bose-Einstein-Kondensation keine so starke Kühlung erfordert. Ein solches System haben Physiker um Ser-

gej Demokritov von der Universität Münster und Burkard Hillebrands von der Universität Kaiserslautern nun entdeckt *(Nature, Bd. 443, S. 430)*.

Ermöglicht wurde der Erfolg durch den Übergang von echten Gaspartikeln zu so genannten Quasiteilchen. Dabei handelt es sich um elementare Anregungen in Festkörpern. Das können zum Beispiel Schallwellen sein. Die Quanten solcher Gitterschwingungen bezeichnen die Physiker analog zu den Photonen, den Lichtquanten, als Phononen. Entsprechend treten in magnetischen Materialien magnetische Wellen auf. In ferromagnetischem Eisen zum Beispiel, aus dem die üblichen Stabmagnete bestehen, sind die magnetischen Momente (Spins) der Eisenatome parallel ausgerichtet. Die kleinstmögliche wellenförmige Störung dieser Anordnung – also ein Spinwellenquantum – wird Magnon genannt.

## La Ola mit Elektronen

Nun gilt in der Quantenwelt der so genannte Welle-Teilchen-Dualismus. Er besagt, dass quantenmechanische Objekte gleichzeitig Teilchen- und Wellennatur haben. Deshalb lassen sich Spinwellen auch als Teilchen auffassen, die typische Partikeleigenschaften wie Impuls oder Energie aufweisen.

Im Ferromagneten bilden diese Quasiteilchen eine Art verdünntes Gas, das sich im Prinzip gleichfalls zur Bose-Einstein-Kondensation bringen lassen sollte. Die Voraussetzungen dafür sind sogar besonders günstig. Die einzige Möglichkeit, um bei normalen Gasen zu erreichen, dass die Atome in genügender Zahl ein und denselben Energiezustand besetzen, besteht darin, sie auf das energetisch tiefste Niveau zu zwingen. Das aber erfordert, sie bis fast auf den absoluten Temperatur-Nullpunkt abzukühlen. In einem Ferromagneten dagegen kann man durch Einstrahlen von Mikrowellen einer bestimmten Frequenz zusätzliche Magnonen erzeugen, die auch bei Zimmertemperatur zunächst einmal alle im tiefsten Energieniveau vorliegen. Steigt dessen Besetzungsdichte über einen kritischen Schwellenwert, vereinigen sich die Quasiteilchen zum Bose-Einstein-Kondensat.

Genau diese Strategie haben die Arbeitsgruppen von Demokritov und Hillebrands verfolgt. Als Ferromagneten verwendeten sie Filme aus dem künstlichen Halbedelstein Yttrium-Eisen-Granat, der auch in der Hochfrequenztechnik ein- ▷


n|w Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Life Sciences

Die Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW umfasst acht Hochschulen mit über 6.000 Studierenden in den Kantonen Aargau, Basel-Landschaft, Basel-Stadt und Solothurn. Die Hochschule für Life Sciences ist international und regional ausgerichtet. Sie generiert Innovationen und Wissen und richtet sich nach gegenwärtigen und zukünftigen Märkten. Am Institut für Medizinaltechnologie ist zum nächstmöglichen Termin folgende Stelle mit Arbeitsort Muttenz zu besetzen:

**Professur im Bereich Intelligente Implantate** (100 %)
Feinwerktechnik / Mikrosystemtechnik

**Ihre Aufgaben**
In einem interdisziplinären Team bearbeiten Sie Problemstellungen in den Bereichen medizinische Mikrosystemtechnik MEMS oder Implantatdesign. Dabei setzen Sie eigene Forschungsschwerpunkte und bauen diese aus. Sie akquirieren Gelder für Projekte in der angewandten Forschung und Entwicklung, die Sie dann in Zusammenarbeit mit Industrie und Forschungsinstitutionen durchführen. Ferner helfen Sie beim Aufbau und der Durchführung der Studiengänge mit und werden auf dem Gebiet der Lehre ausgewählte Themen angemessen vertreten.

**Ihr Profil**
Sie verfügen über einen relevanten Studienabschluss mit Promotion und können sowohl eine internationale akademische Laufbahn als auch mehrjährige F&E-Erfahrung in der Industrie vorweisen, vorzugsweise im Bereich der Konstruktion medizintechnischer Systeme und Implantate und in der Anwendung biokompatibler bzw. bioaktiver Materialien. Zudem haben Sie in der Vergangenheit bereits klinische Studien begleitet und können auf Grund Ihrer Kontakte in die Medizin neue Ideen und Lösungen für medizinische Fragestellungen generieren. Erfahrung in der Lehrtätigkeit an einer Hochschule ist von Vorteil, ebenso ein Faible für das Management von Forschungsvorhaben. Wegen der internationalen Ausrichtung der Fachhochschule ist die Beherrschung von Fremdsprachen, insbesondere Englisch, in Wort und Schrift unerlässlich.

**Ihre Bewerbung**
Nähere Auskünfte erteilt Ihnen gerne
Prof. Dr. Erik Schkommodau, Institutsleiter,
Tel. +41 (0)61 467 42 46, E-Mail: erik.schkommodau@fhnw.ch.

Ihre Bewerbung senden Sie bitte bis zum 10.04.2007 an
Heiner Christ, Leiter Personaladministration, FHNW,
Gründenstrasse 40, CH-4132 Muttenz.

www.fhnw.ch

▷ gesetzt wird. Er ist bekannt dafür, dass sich mit Mikrowellen leicht Magnonen darin anregen lassen. In diesem Material erzeugten die Forscher mittels einer kleinen Antenne, die an einen Mikrowellengenerator angeschlossen war, große Mengen solcher Magnonen. Durch so genannte Brillouin-Streuung verfolgten sie zugleich deren Dichte im energetischen Grundzustand. Diese lag, wie sich zeigte, ab einer bestimmten Intensität der Mikrowellenstrahlung über dem kritischen Wert, bei dem die Magnonen der Theorie zufolge zu einem Bose-Einstein-Kondensat verschmelzen sollten.

## Internationale Ehrung

Um festzustellen, ob dies tatsächlich geschah, schalteten die Forscher den Mikrowellengenerator aus und verfolgten die Besetzungsdichte des niedrigsten Energieniveaus der Magnonen weiter. Normalerweise leert sich dieses Niveau durch Stöße zwischen den einzelnen Quasiteilchen sehr schnell. Nicht so, wenn in dem Experiment die Intensität der Mikrowellen derart gesteigert wurde, dass die Anzahl der Magnonen im energetisch tiefsten Zustand laut Theorie für die Bose-Einstein-Kondensation ausreichen sollte. In diesem Fall nahm die Besetzungsdichte des niedrigsten Energieniveaus nach dem Abschalten des Mikrowellengenerators nur relativ langsam ab. Die beiden Forscher werten dies als klares Indiz dafür, dass tatsächlich ein Bose-Einstein-Kondensat entstanden war, das sich durch eine besondere Stabilität auszeichnete, weil keine Stoßvorgänge darin stattfinden.

»Uns gelang es mit Glück, einen neuen experimentellen Zugang zu dem faszinierenden Gebiet von korrelierten Phänomenen in Festkörpern zu finden«, resümiert Hillebrands das Ergebnis der Versuche. »Nun stehen weiterführende Experimente an, zum Beispiel die Suche nach neuen gebundenen Magnonenzuständen, die analog zu Cooper-Paaren in der Supraleitung existieren könnten.«

Welche Bedeutung die Arbeit der Physiker aus Münster und Kaiserslautern hat, drückt sich auch in einer Ehrung aus: Vom Onlineportal »Physicsweb« des internationalen Institute of Physics mit Hauptsitz in London wurde sie zu einer der zwölf besten im letzten Jahr erklärt.

**Jürgen Brück** hat sich als freier Journalist in Bonn auf Physik, Kosmologie und Nanotechnologie spezialisiert.

# Springers Einwürfe

## Kinderkrippen und »Rabenmütter«

**Haben berufstätige Frauen gestörte Kinder?**

*Lady Madonna*
*Children at your feet*
*Wonder how you manage*
*To make ends meet*
*Lennon/McCartney*

**Seit eine christdemokratische Familienministerin** die Einrichtung von Kinderkrippen forciert, ist der schon seit Langem schwelende Streit um die richtige Familienpolitik mit neuer Heftigkeit entbrannt. Das Für und Wider um das Wohl des Kindes spaltet Kirchen und Parteien; es hat Züge eines veritablen Kulturkampfs angenommen. Da beide Seiten sich auf die Wissenschaft berufen – hier wie dort werden Befunde aus Hirnforschung und Psychologie ins Treffen geführt –, droht das klassische Expertendilemma. Die einen rufen hü, die anderen hott. Da fragt sich der teilnehmende Beobachter: Wer hat nun Recht?

Unstrittig ist, dass das Neugeborene im ersten Lebensjahr am besten bei der Mutter aufgehoben bleibt. Doch bei der Zeit danach scheiden sich die Geister. Die einen meinen, auch in den Folgejahren entwickle sich das Kind nur im ununterbrochenen Kontakt mit der Mutter optimal; die anderen verweisen auf entwicklungspsychologische Indizien für das Entstehen sozialer Neugier – und die werde am besten in Krabbelgruppen gestillt.

Dabei ist zu bedenken, dass das typische Kleinkind heute längst nicht mehr in einer kinderreichen ländlichen Großfamilie aufwächst, sondern oft als Einzelkind in städtischen Kleinfamilien mit zwei berufstätigen Eltern (wie meine Tochter) oder gar nur mit einer allein erziehenden Mutter (wie meine Enkelin). Da kompensiert die Kinderkrippe ein soziales Defizit, das mit der Modernisierung – und Atomisierung – der Gesellschaft notwendig einhergeht und übrigens analog auch beim Problem der Altenpflege auftritt: Was die traditionelle Familie einst von selbst geleistet hat, müssen heute soziale Dienste übernehmen.

**Dennoch steht die prinzipielle Frage:** Sollte das Kleinkind lieber möglichst daheim bei der rund um die Uhr verfügbaren Mutter bleiben? Schaden Berufstätigkeit der Mutter und Kinderkrippe seiner Entwicklung?

Die wohl gründlichste Studie zum Thema hat in den USA das National Institute on Child Development (NICHD) angestellt, das mehrere tausend Kinder von Geburt an beobachtete. Das Ergebnis: Fremdbetreuung – selbst wenn sie zu wünschen übrig lässt! – stört weder die Mutter-Kind-Bindung noch die kindliche Entwicklung merklich. Freilich gilt der NICHD-Studie zufolge auch: Das Kindswohl hängt in jedem Fall entscheidend von der Qualität der Mutter-Kind-Beziehung ab, von mütterlicher Zuwendung und Sensibilität. Ist die Mutter gestresst und chronisch abgelenkt und obendrein die Krippenbetreuung schlecht, so leidet das Kind.

Aber bedingt Berufstätigkeit nicht gerade das typische Profil der gestressten »Rabenmutter«, die keine Zeit fürs Kind aufbringt, wodurch es weniger gesund heranwächst und später sogar eher zu kriminellem Verhalten neigt? Auch das wird von einer 2006 publizierten Langzeitstudie verneint, die Adele E. Gottfried und Allen W. Gottfried von der California State University durchführten *(American Behavioral Scientist, Bd. 49, S. 1310)*. Als positiven Nebeneffekt weiblicher Berufstätigkeit erwähnen die Forscher, dass sich der Vater stärker an der Kinderbetreuung beteilige, was seine Bindung an das Kind dauerhaft verstärke. Das kann ich aus eigener Erfahrung nur bestätigen.

Michael Springer

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

# Wolkige Projektionen

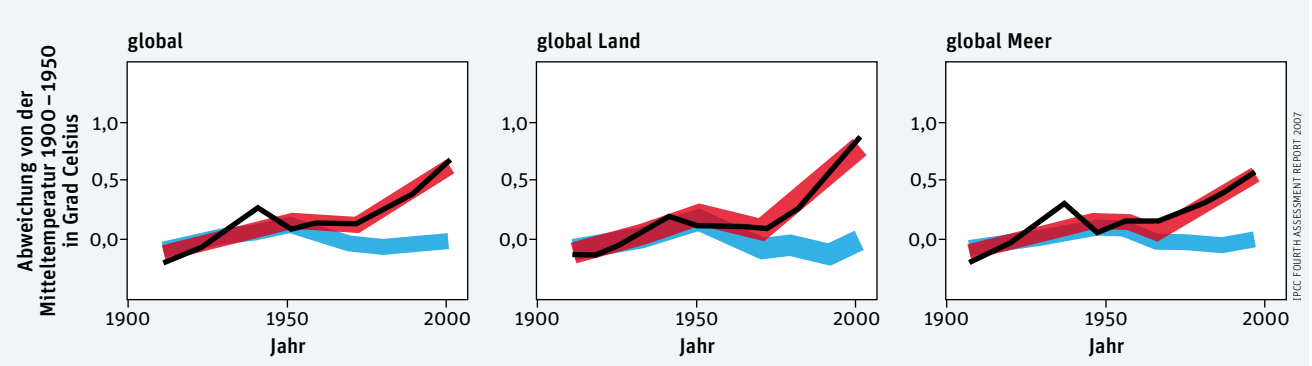
**Nachweislich zuverlässige Klimavorhersagen sind noch nicht möglich. Umso mehr wird die Diskussion über den Klimawandel von ökonomischen und politischen Interessen bestimmt. Sie sollten offengelegt werden.**

Von Sven Titz

Anfang Februar dieses Jahres schien die Debatte gelaufen zu sein. Der neue UN-Klimabericht wurde fast einhellig als finaler Beweis dafür gewertet, dass die Menschheit für die globale Erwärmung verantwortlich ist. Der größte Teil des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts gehe mit neunzigprozentiger Wahrscheinlichkeit auf den Ausstoß von Treibhausgasen zurück, bezifferte das International Panel on Climate Change (IPCC) der Vereinten Nationen die Überzeugungskraft der Indizien. In der Öffentlichkeit wurde rasch der Wunsch nach entschlossenem Handeln laut. Seitdem stehen die Zeichen der Zeit auf Klimaschutz.

Die wissenschaftliche Debatte geht jedoch auch nach dem Fourth Assessment Report des IPCC weiter. Viele Details des Klimas und des Klimawandels müssen erst noch erforscht werden. Und vor allem sollte man bei der Einschätzung der Warnungen beachten, dass die Zuverlässigkeit eines der wichtigsten Instrumente, auf dem sie beruhen, nach wie vor nicht erwiesen ist. Trotz aller Fortschritte steht noch immer nicht fest, dass sich mit Klimamodellen das Klima tatsächlich korrekt vorhersagen lässt. Den Modellen fehlt eine entscheidende wissenschaftliche Qualifikation: Es war bislang unmöglich, ihre Vorhersagegüte rigoros zu testen. Das ist kein vernachlässigbares Problem.

Der Philosoph Karl Popper forderte von wissenschaftlichen Aussagen, widerlegbar zu sein. Hypothesen ließen sich niemals direkt beweisen, sondern erlangten ihre Glaubwürdigkeit nur dadurch, dass alle Versuche zu ihrer Widerlegung scheiterten. Klimavorhersagen sind zwar grundsätzlich widerlegbar. Sie zu testen dauert aber extrem lange, denn das, was prognostiziert werden soll, ist schließlich nichts anderes als die Statistik des Wetters über viele Jahre. Die Weltmeteorologieorganisation (WMO) nennt in ihrer Definition des Klimas einen Zeitraum von dreißig Jahren.



CSIRO SCIENCE IMAGE ONLINE

**Ausgedörrte Böden – wie hier in Australien – stehen für eine der vorhergesagten Folgen des Klimawandels: mehr extreme Hitze- und Trockenperioden in bestimmten Regionen.**

Nehmen wir einmal an, im Jahr 1990, als der erste IPCC-Sachstandsbericht erschien, wäre eine Klimasimulation für die darauf folgenden hundert Jahre durchgeführt worden. Die gerade erwähnte 30-Jahresperiode würde dann erst 2020 enden. Und selbst zu diesem Zeitpunkt wäre es streng genommen noch nicht möglich, die Modellvorhersage aus dem Jahr 1990 endgültig zu bewerten. Wenn die Prognose einträfe, könnte das ebenso gut aus Zufall geschehen sein. Auch ein Wettervorhersagemodell hat nicht nach einer einzigen korrekten Prognose schon den Gütetest bestanden, sondern muss sich bei einer Vielzahl von Vorhersagen bewähren. Die Resultate der ersten Computersimulation des Weltklimas mit einem globalen Zirkulationsmodell wurden 1975 von Syukuro Manabe und Richard Wetherald veröffentlicht; physikalisch konsistente Modelle existieren seit der Jahrtausendwende. Bis deren Prognosen einem strengen Test unterzogen werden können, müssen wir darum noch eine ganze Reihe von Jahren warten.

**Die globale Mitteltemperatur ist sowohl für Landflächen als auch im Meer in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts gegenüber dem Durchschnitt der Jahre 1900 bis 1950 gestiegen (schwarze Kurve). Dieser Anstieg lässt sich in Klimasimulationen nicht reproduzieren, sofern als externe Faktoren nur die Sonne und Vulkanausbrüche eingehen (blau) – wohl aber, wenn auch der menschliche Einfluss in Gestalt von Treibhausgasen, Aerosolen und Veränderungen der Landoberfläche berücksichtigt wird (rot).**

## Szenarien statt Prognosen

Weil sich die Vorhersagen von Klimamodellen nicht richtig prüfen lassen, vermeiden es die meisten Fachleute wohlweislich, das Wort »Klimavorhersage« überhaupt in den Mund zu nehmen. Stattdessen sprechen sie lieber von einer Projektion. Diese liefert eine mögliche Klimazukunft oder gibt eine Entwicklungstendenz an. Sie ist aber nur die Vorstufe einer wirklichen Vorhersage.

Und wie steht es mit dem Blick zurück? Im Prinzip sollten sich die Computerprogramme am Klima der Vergangenheit ausprobieren und trainieren lassen. Der zuständige Forschungszweig der Paläoklimatologie ist in der Tat äußerst fruchtbar. Eisbohrkerne, Korallen, Stalagmiten, See- und Meeressedimente, Baumringe – es gibt zahlreiche Indikatoren, an denen sich klimatologische Größen wie die Temperatur, der Niederschlag oder sogar die Häufigkeit von Stürmen aus der Klimageschichte ablesen lassen. Immerzu werden neue »Proxys« aufgespürt, wie diese Stellvertreterdaten gemeinhin heißen.

Um das Klima vergangener Epochen zu rekonstruieren, kombiniert man die Proxys mit Computersimulationen. Allerdings sind die Paläodaten noch sehr lückenhaft, und für manche entscheidenden Klimagrößen gibt es überhaupt keine Proxys – für die weltweite Wolkenbedeckung zum Beispiel. Daher ist auch für das vergangene Klima keine strikte Prüfung der Modelle möglich.

Weil sich die Ergebnisse von Klimaprognosen also streng genommen derzeit keinem rigorosen Test unterziehen lassen, berufen sich viele Klimaforscher in ihren Warnungen vor dem Treibhauseffekt darauf, dass die Computerprogramme das Klima der letzten ungefähr hundert Jahre, für die es viele Messwerte gibt, korrekt wiedergeben können – im Nachhinein wohlgemerkt. ▷

▷ Das mag im Großen und Ganzen stimmen, doch auch hier gibt es noch eine Menge Probleme.

Zum Beispiel lässt sich die Entwicklung des ozeanischen Wärmehaushalts bisher nicht richtig simulieren, und die Temperaturmessungen sind umstritten. Die oberen Meeresschichten bis in eine Tiefe von 750 Metern haben nach Untersuchungen einer Gruppe um John M. Lyman vom Pacific Marine Environmental Laboratory der NOAA in Seattle (Washington) in den zwei Jahren zwischen 2003 und 2005 etwa zwanzig Prozent der Wärmeenergie verloren, die sie seit 1955 aufgenommen hatten. Was diesen Wärmeverlust verursacht haben könnte, ist noch unklar. Vermutet wird eine natürliche Klimaschwankung.

Zu diesem Verständnisproblem kommt ein möglicherweise gravierender Messfehler hinzu. Viktor Gouretski vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven und Klaus Peter Koltermann von der Intergovernmental Oceanographic Commission der Unesco haben jüngst herausgefunden, dass viele ozeanische Temperaturmessdaten, die seit Mitte der 1960er Jahre erhoben wurden, um 0,2 bis 0,4 Grad zu hoch liegen könnten. Falls diese Daten korrigiert werden müssen, hieße das, dass die Ozeanschicht zwischen der Oberfläche und einer Tiefe von 3000 Metern zwischen 1957 und 1997 ungefähr 38 Prozent weniger Wärme aufgenommen hat als gedacht. Der von Gouretski und Koltermann abgeschätzte Wärmegewinn ist außerdem immer noch sehr ungenau – die Autoren geben eine Unsicherheit von zwei Dritteln des berechneten Werts an.

Diese Mängel in der Mess- und Simulationsleistung sind keine gute Nachricht für Klimaforscher, denn die Ozeane bilden eine zentrale Komponente des Klimasystems. Schließlich ist die Erdoberfläche zu mehr als zwei Dritteln von Wasser bedeckt, und die Meere können mehr als tausendmal so viel Wärmeenergie speichern wie die Atmosphäre. Der Wärmehaushalt der Ozeane gilt darum als eine der wichtigsten Messgrößen für den Treibhauseffekt überhaupt (siehe Spektrum der Wissenschaft, Januar 2005, S. 50).

## Probleme mit natürlichen Klimaschwankungen

Ferner sind Klimamodelle noch nicht in der Lage, die natürliche Klimavariabilität korrekt wiederzugeben. Das gilt insbesondere für El Niño, die auf kurzen Zeitskalen stärkste natürliche Klimaschwankung. Über diese Erwärmung des Meerwassers im Ostpazifik, die alle zwei bis sieben Jahre auftritt und mit einer Umstellung der atmosphärischen Zirkulation verknüpft ist, rätseln Experten nach wie vor. Das Phänomen beeinflusst das Wetter auf der ganzen Erde; jedes El-Niño-Ereignis hebt die globale Durchschnittstemperatur der Luft um ein paar Zehntelgrad an.

Die Vorhersagemodelle scheitern noch an der so genannten »spring barrier« – erst nach dem Frühling können die Klimaforscher ihrer Prognose trauen. Das war im jüngsten Fall nicht anders: Dass sich Ende des vergangenen Jahres ein El Niño anbahnen würde, zeigten die Modelle selbst im April 2006 noch nicht an. Verlässliche Aussagen darüber, wie sich dieses Phänomen im Verlauf des 21. Jahrhunderts entwickeln wird, sind daher nicht möglich.

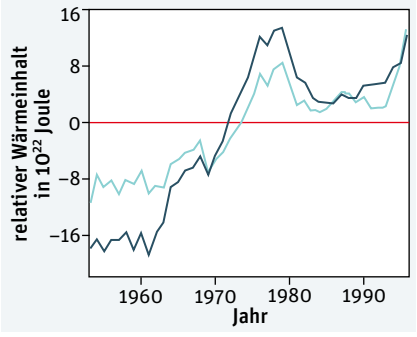
Zu den unsichersten Elementen in den Klimasimulationen zählen bekanntermaßen die Wolken. Die Probleme, die damit zusammenhängen, sind komplex. Sie haben besonders mit dem Effekt zu tun, den Aerosolteilchen auf die Kondensation von Wasserdampf ausüben. Dunkle Partikel, die Sonnenstrahlen absorbieren und auf diese Weise eine Luftschicht aufheizen, können die Wolkenbildung verhindern. Hellere Teilchen bewirken als Kondensationskeime manchmal das Gegenteil. Außerdem ist in jedem Klimamodell die Höhe der Wolken und die kondensierte Wassermenge unterschiedlich.

All diese Unsicherheiten betreffen auch den Strahlungshaushalt des Klimasystems und somit Rückkopplungen, die den Treibhauseffekt verschärfen oder lindern können. Die Atmosphärenkomponenten der Klimamodelle haben nur eine Auflösung von 200 Kilometern. Weil einzelne Wolken um ein Vielfaches kleiner sind, wird es noch lange dauern, bis sich die entsprechenden Prozesse realistisch mit dem Computer simulieren lassen. Bis dahin müssen sich Klimaforscher mit Notlösungen behelfen.

Doch vielleicht sind all diese Unzulänglichkeiten gar nicht so bedenklich, wie es den Anschein hat. Möglicherweise brauchen wir nicht unbedingt ausgefeilte, nachweislich korrekte Computerprogramme, um zu belegen, dass wir dabei sind, in fahrlässiger Weise ins irdische Klimasystem einzugreifen. In ihrem populärwissenschaftlichen Buch »Der Klimawandel« argumentieren zum Beispiel Stefan Rahmstorf und Hans-Joachim Schellnhuber: »Auch ohne diese Modelle würde alle Evidenz sehr stark darauf hindeuten, dass der Mensch durch seine Emissionen von $CO_2$ und anderen Gasen im Begriff ist, das Klima einschneidend zu verändern«, heißt es dort.

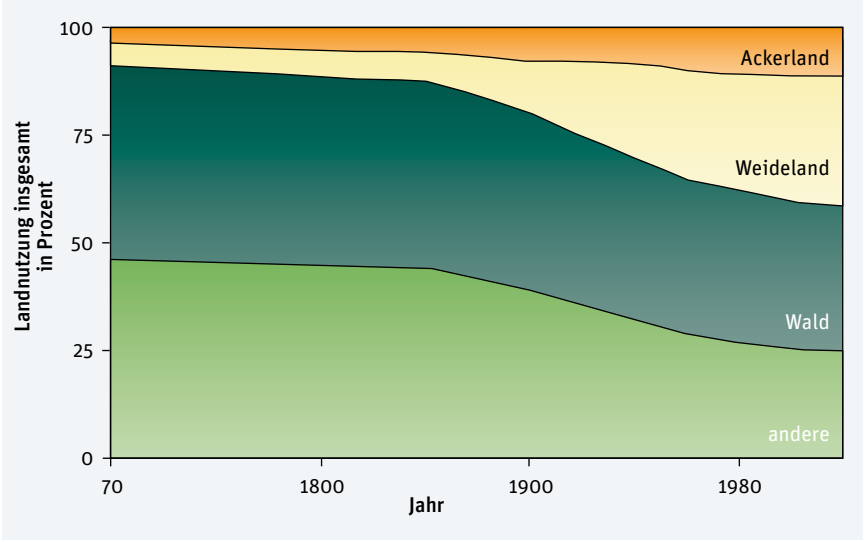
In der Tat liefert der anthropogene Treibhauseffekt die am genauesten durchdachte Hypothese, die zum großen Teil erklären kann, weshalb die Temperatur der bodennahen Luftschicht im vergangenen Jahrhundert um ungefähr 0,7 Grad Kelvin gestiegen ist. Im aktuellen IPCC-Report sind viele Belege dafür zu finden – daher auch die oben erwähnte Wahrscheinlichkeit von neunzig Prozent. Sie beruht auf einem Konsens unter den Klimaexperten, die an dem Report mitgewirkt haben.

Doch so imposant die Zahl neunzig Prozent klingen mag – bei den IPCC-Belegen handelt es sich immer noch um ziemlich unsicheres Wissen. Oben habe ich schon einige Probleme der Messung und Modellierung genannt. Zudem beeinflusst der Mensch das Klima nicht allein durch die Treibhausgase. Andere anthropogene Faktoren könnten eine größere Rolle für den Klimawandel spielen,




AUS: V. GOURETSKI, K. P. KOLTERMANN, GEOPHYSICAL REVIEW LETTERS 2007, BD. 34, L01610

**Die Erwärmung der Weltmeere wurde womöglich überschätzt. Darauf weist eine Analyse von Messfehlern bei Ozeanthermometern hin. Die bisherige Auswertung ergab eine starke Zunahme des Wärmegehalts (dunkelblaue Linie) in der Wasserschicht bis 3000 Meter Tiefe. Werden neu erkannte Abweichungen eines bestimmten Thermometertyps berücksichtigt, reduziert sich dieser Anstieg (türkisblaue Linie) um fast vierzig Prozent.**




AUS: G. K. KLEIN, ESTIMATING GLOBAL LAND USE CHANGE OVER THE PAST 300 YEARS. IN: GLOBAL BIOGEOCHEM. CYCLES 2001, BD. 15, NO. 2, S. 417–434

**Auch durch eine geänderte Landnutzung hat der Mensch das Klima beeinflusst. In den vergangenen 300 Jahren ist der Anteil von Acker- und Weideflächen auf Kosten von Wald und anderen Vegetationstypen auf heute etwa vierzig Prozent der gesamten Erdoberfläche angewachsen. Wie sich dieser Wandel auf das regionale und globale Klima auswirkt, ist allerdings erst in Ansätzen erforscht.**

als bisher angenommen wurde – etwa die Aerosole und die Veränderung der Landoberfläche. Im neuen IPCC-Bericht wird diesen beiden Faktoren viel Platz eingeräumt. Der US-Klimaforscher Roger Pielke sen. wies schon vor mehr als 15 Jahren darauf hin, dass diese menschlichen Einflüsse bei der Untersuchung des Klimawandels nicht vernachlässigt werden sollten.

Aus der enormen Komplexität und Nichtlinearität des Klimas zieht Hendrik Tennekes, ehemaliger Leiter der Forschungsabteilung im staatlichen Wetterdienst der Niederlande, einen radikalen Schluss: Er bezweifelt grundsätzlich, dass die Naturwissenschaften in absehbarer Zeit eine allgemein akzeptierte wissenschaftliche Grundlage für politische Maßnahmen hervorbringen können, die den Klimawandel betreffen. Mit dieser Einschätzung befindet er sich freilich in der Minderheit. Anders als Tennekes sind viele Klimaforscher der Ansicht, das Klima reagiere auf eine Störung zunächst einmal linear. Diese Tatsache garantiere eine gewisse Vorhersagbarkeit. Dennoch gebe es so genannte »Tipping Points«. An diesen kritischen Punkten könnten nichtlineare, katastrophale Prozesse auftreten.

Eines der Paradebeispiele für ein mögliches Umkippen im Klimasystem ist die Ozeanzirkulation im Nordatlantik. Vertreter der »Tipping Points«-Denkschule nennen auch den brasilianischen Regenwald oder den indischen Monsun als Exempel für Subsysteme des Klimas, die von einer plötzlichen desaströsen Entwicklung bedroht sind.

Das Argument der nichtlinearen Schwellenwerte stützt die Warnungen vor dem Klimawandel optimal. Dieser Logik zufolge ist das Klima linear und vorhersagbar genug, um den Projektionen Glaubwürdigkeit zu verleihen, doch zugleich in einem Maße nichtlinear und unvorhersehbar, dass wir uns vor den katastrophalen Konsequenzen des anthropogenen Klimawandels fürchten müssen. Die Argumente untermauern die Warnungen auf so perfekte Weise, dass es fast schon unheimlich wirkt.

## Unklare außerwissenschaftliche Interessen

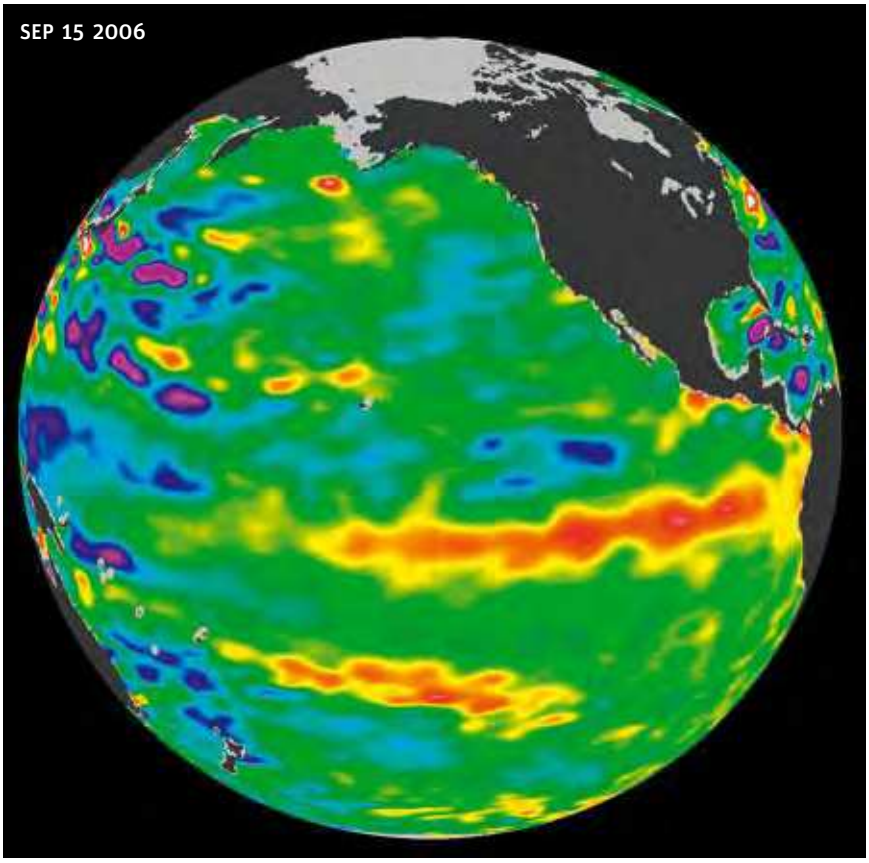
Doch fußt diese Argumentation wirklich auf rein wissenschaftlichen Fakten? Und wie sieht das bei dem skeptischen Tennekes aus? Die Frage nach möglichen nichtwissenschaftlichen Motiven stellt sich angesichts der lückenhaften Kenntnis über das Klimasystem und den Klimawandel bei vielen Debattenbeiträgen. Welchen Beweismitteln jemand Glauben schenkt und welchen nicht, kann schließlich auch von Faktoren abhängen, die außerhalb der Wissenschaft liegen. Je unsicherer die Wissensbasis ist, desto mehr Spielraum bleibt für externe Interessen.

Starke politische Interessen entspringen gewöhnlich dem Bereich der Ökonomie. Das gilt auch für die Klimadebatte. Welche politischen Kräfte verhindern wollen, dass der Klimawandel als ernsthaftes Problem anerkannt wird, wurde schon häufiger beschrieben. Sicherlich ist bestimmten Industriezweigen stark daran gelegen, Maßnahmen zum Klimaschutz möglichst zu verhindern. So haben Lobbyisten von Unternehmen im Bereich der fossilen Energiequellen die Öffentlichkeit wohl nicht aus uneigennützigen Gründen jahrelang davon zu überzeugen versucht, der Klimawandel sei völlig harmlos.

Doch den umgekehrten Fall gibt es auch. Ist etwa niemandem damit gedient, wenn die Gesellschaft sich vor der globalen Erwärmung ängstigt? Da wären zum Beispiel Versicherungsunternehmen: Wenn die Risiken des Klimawandels in den Projektionen größer erscheinen, als sie real sind, können die Versicherer überhöhte Prämien verlangen. Unternehmen im Bereich der erneuerbaren Energiequellen haben ein vitales Interesse daran, dass der Klimaschutz in der Öffentlichkeit Vorrang hat gegenüber billigen Energiepreisen. Bis auf wenige Ausnahmen hängt die Existenz solcher Firmen derzeit noch am Tropf staatlicher Unterstützung.

Wer Interessen nichtmaterieller Art vertritt, profitiert unter Umständen ebenfalls davon, wenn sich die Gesellschaft vor dem anthropogenen Klimawandel ängstigt. Zu dieser Gruppe zählen alle Anhänger von Weltanschauungen, mit denen sich die Sorge um das Klima gut verträgt. In Kreisen von Umweltschützern genießt zum Beispiel die Gaia-Hypothese des Biologen James Lovelock große Popularität: In ihrer strengen Variante besagt sie, dass die Erde ein Metaorganismus ist, der selbst dafür sorgt, dass die eigenen Lebensbedingungen stabil bleiben. Nach der Lesart von Lovelock greift der Mensch drastisch in Gaias Selbstregulierung ein und wird darum mit katastrophalen Folgen bestraft.

Auch Christen können weltanschaulich aus dem Menetekel des anthropogenen Klimawandels Kapital schlagen. Aus ihrer Sicht droht der Mensch durch ▷




**Das El-Niño-Ereignis Ende letzten Jahres – ein Anstieg der Wassertempertur und damit des Meeresspiegels (rot) im äquatorialen Ostpazifik – sagten Computerprogramme selbst im April 2006 noch nicht vorher. Solche Klimaschwankungen lassen sich bis heute nicht langfristig prognostizieren.**

▷ rücksichtslosen Umgang mit der Natur die göttliche Schöpfung zu gefährden. Es verwundert daher nicht, dass sich im vorigen Jahr die evangelikalen Christen in den USA dem Kampf gegen den Klimawandel anschlossen.

Anti-Ideologien können sich mit der Klimaangst ebenfalls leicht anfreunden. Wer zum Beispiel die USA für das Grundübel unserer Zeit hält, wird den unmäßigen Öldurst des Landes verurteilen und schon aus Gründen der Selbstachtung für den heimischen Klimaschutz eintreten. Die Vertreter einer marxistischen Weltanschauung können anhand der Treibhausfrage die Rücksichtslosigkeit des Kapitals anprangern.

## Ende der Debatte wäre verfrüht

Ich will keineswegs behaupten, wir brauchten uns über den Klimawandel keine Sorgen zu machen. Je nachdem, wie groß die Risiken durch den vom Menschen verstärkten Treibhauseffekt einzuschätzen sind, können präventive Maßnahmen zum Klimaschutz nicht nur gerechtfertigt, sondern auch dringlich erscheinen. Möglicherweise haben wir keine Zeit zu warten, bis hieb- und stichfeste Beweise für die ausschlaggebende Rolle des anthropogenen Treibhauseffekts vorliegen, weil die potenzielle Bedrohung zu groß und zu akut ist – das ist eine heikle Ermessensfrage.

Angesichts der weiter bestehenden Unsicherheiten wäre es jedoch verfrüht, die Debatte über die Ursachen und das Ausmaß des Klimawandels schlicht für beendet zu erklären.

Bei vielen Wortführern in der öffentlichen Diskussion ist die wissenschaftliche Erkenntnis jedenfalls nicht der einzige Grund für ihr Engagement. Und nicht alle im weitesten Sinne politischen Interessen werden in der öffentlichen Diskussion über den Klimawandel klar genug artikuliert. Den Verdacht der Voreingenommenheit möchte ich ausdrücklich nicht auf die Mitwirkenden des IPCC beziehen – der Sachstandsbericht ist ein sorgfältig kompiliertes Dokument, dessen austarierter Entstehungsprozess ein hohes Maß an Objektivität garantiert. Doch in der öffentlichen Auseinandersetzung werden nach meiner Beobachtung zahlreiche Argumente nur deshalb vorgebracht und anerkannt, weil die jeweiligen Akteure sie gesucht haben und an die Konsequenzen glauben möchten. Dies gilt beim Klimaproblem nicht nur für die Skeptiker, sondern auch für die Warner.

Die Debatte über den anthropogenen Klimawandel würde an Transparenz gewinnen, wenn die Interessen, die von den beteiligten Menschen und Institutionen verfolgt werden, offener zu Tage träten. Der Wissenschaft kommt hier eine besondere Verantwortung zu. So manchen Forschern stünde es gut zu Gesicht, wenn sie weltanschaulich oder anderweitig motivierte Statements deutlicher von Äußerungen trennen würden, die allein ihrem wissenschaftlichen Erkenntnisinteresse entspringen.

Tennekes erinnerte neulich an einen Appell des US-Physikers Harvey Brooks, ehemals Dekan an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts). Brooks forderte 1973 in einem Buch über die Manipulation des Wetters: »Wissenschaftler, deren Meinung politisches Gewicht besitzt, haben die Pflicht, ihre politischen und ethischen Grundannahmen offenzulegen. Und sie sollten versuchen, mit sich selbst, ihren Kollegen und ihrem Publikum ehrlich zu sein hinsichtlich des Ausmaßes, in dem ihre Grundannahmen ihre Auswahl und Interpretation der wissenschaftlichen Belege beeinflusst haben.« Dem ist nichts hinzuzufügen. ◁

**Sven Titz** arbeitet als promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Der Klimawandel. Von S. Rahmstorf und H.-J. Schellnhuber. Verlag C. H. Beck, München 2006

How much is the ocean really warming? Von Viktor Gouretski und Klaus Peter Koltermann in Geophysical Review Letters, Bd. 34, L01610, Januar 2007

Human impacts on weather and climate. Von W. R. Cotton und R. A. Pielke sen. Cambridge University Press 2007

Recent cooling of the upper ocean. Von J. M. Lyman et al. in: Geophysical Research Letters, Bd. 33, L18604; 20. 9. 2006

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/866418

Hier scheint die Dunkle Energie aus der Tiefe des Raumes auf Galaxien einzuwirken. Vermutlich ist diese abstoßende Energie jedoch gleichmäßig verteilt – und prägt dennoch das Schicksal der Welteninseln.

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

# Die unsichtbare Hand des Universums

Die rätselhafte Dunkle Energie beschleunigt nicht nur die Expansion des Kosmos. Astronomen entdecken jetzt, dass sie auch Formen und Verteilung der Galaxien prägt.

Von Christopher J. Conselice

Im Jahr 1998 erkannten die Astronomen, dass sie zuvor ganze drei Viertel vom Inhalt des Universums übersehen hatten: die Dunkle Energie. Dieses noch immer rätselhafte Phänomen hat die Zukunft des Alls im Griff. Von allen Seiten zerrt sie an uns – und dennoch sind wir nahezu vollständig blind dafür. Einige Theoretiker hatten zwar spekuliert, dass eine solche Energie existieren könnte, doch auch für sie war ihr Nachweis ein Meilenstein der Kosmologie. Obwohl sie eine Säule des heutigen Standardmodells der Kosmologie darstellt, werden vermutlich neuartige physikalische Theorien nötig sein, um ihr Wesen zu deuten.

Forscher entdecken gerade erst, welche Eigenschaften die Dunkle Energie hat und welche Konsequenzen sich daraus ergeben. Dass diese die Geschicke des Universums als Ganzes beeinflusst, erkannten sie sofort. Erst danach geriet die geheimnisvolle Energie in Verdacht, die Entwicklung von Sternen, Galaxien und Galaxienhaufen zu prägen. Haben Astronomen das Wirken der Dunklen Energie vielleicht sogar seit Jahrzehnten beobachtet, ohne es zu merken?

Gerade durch ihre Allgegenwart macht es uns die Dunkle Energie offenbar schwer, sie zu bemerken. Im Gegensatz zur sichtbaren Materie und der unsichtbaren Dunklen Materie ist sie völlig gleichmäßig im Raum vorhanden. Ob in Ihrer Küche oder weit außerhalb der Milchstraße: Überall beträgt die Dichte der Dunklen Energie $10^{-26}$ Kilogramm pro Kubikmeter – das entspricht nur wenigen Wasserstoffatomen in diesem Volumen. (Energie und Masse werden über Einsteins Formel $E = mc^2$ ineinander umgerechnet.) Die in unserem Sonnensystem enthaltene Dunkle Energie entspricht höchstens der Masse eines kleinen Asteroiden. Spürbare Auswirkungen hat sie hier nicht, diese sind erst auf viel größeren Strecken und langen Zeitspannen erkennbar.

## Wie Rosinen im Hefeteig

Seit den 1920er Jahren sind sich Beobachter darin einig, dass sich – mit Ausnahme der Nachbarn unseres Milchstraßensystems – alle Galaxien von uns entfernen. Dem so genannten Hubble-Gesetz zufolge hängt die Geschwindigkeit dieser Fluchtbewegung linear vom Abstand der Welteninseln ab: Je ferner eine Galaxie ist, umso schneller entfernt sie sich. Dass sie alle ausgerechnet vor unserem Milchstraßensystem fliehen, ist dabei kaum wahrscheinlich. Kosmologen schließen aus der Beobachtung vielmehr, dass es der Raum selbst ist, der expandiert und die Galaxien dabei mit sich zieht – ähnlich wie Rosinen in einem Hefeteig, der beim Backen aufgeht (siehe SdW 5/2005, S. 38).

Über Jahrzehnte fragten sich Astronomen, ob sich die Expansionsrate des Kosmos mit der Zeit verändert. Denkbar schien, dass sie auf Grund der Schwerkraft zwischen den Galaxien allmählich sinkt. Doch nur über äußerst große Entfernungen und Zeiträume sollte das festzustellen sein. Will man dies nachweisen, muss man nach Objekten Ausschau halten, deren Entfernung und Fluchtgeschwindigkeit man auch noch in großem Abstand genau bestimmen kann. Von allen uns bekannten Objekten eignen sich dafür Supernovae am besten. Diese explodierenden Sterne leuchten über mehrere Wochen hell auf und erreichen im Maximum eine recht einheitliche Helligkeit. Dank moderner Teleskope und Detektoren können wir sie noch im Abstand von mehreren Milliarden Lichtjahren nachweisen.

Als zwei Arbeitsgruppen unabhängig voneinander Ende der 1990er Jahre aus entfernten Supernovae die Änderung der kosmischen Expansionsgeschwindigkeit ableiteten, überraschte sie das Ergebnis: Offenbar hatte sich der Kosmos in seiner Frühzeit langsamer ausgedehnt als heute, die Expansion scheint sich zu beschleunigen (siehe SdW 3/1999, S. 38, und SdW 7/2004, S. 42). Weitere Beobachtungen von Supernovae sowie davon unabhängige Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung bestätigten dieses zunächst verblüffende Ergebnis.

Erklären könnte man sich die Beobachtung damit, dass die Schwerkraft auf großen Entfernungen einem anderen Gesetz folgt als auf kleineren, die wir im Labor sowie im Sonnensystem überprüfen können. Dann wäre die Anziehungskraft zwischen den Galaxien zu schwach, um die Expansion abzubremsen. Die meisten Wissenschaftler sind jedoch davon überzeugt, dass das Gesetz der Schwerkraft universell gültig ist und es vielmehr eine bislang unbekannte Art der Energie gibt, welche die Anziehungskraft zwischen den Galaxien übersteigt ▷

▷ und diese auseinandertreibt. Auch wenn diese Dunkle Energie in unserem Milchstraßensystem keine beobachtbare Konsequenz hat, würde sie insgesamt den Kosmos dominieren.

Die Dunkle Energie bestimmt jedoch nicht nur den Verlauf der kosmischen Expansion. Wie Forscher inzwischen herausfanden, wirkt sie auch auf die im Universum enthaltene Materie ein. Diese ist keineswegs gleichmäßig verteilt, sondern bildet ein Netz von Filamenten, fadenförmigen Strukturen, die sich über viele Millionen Lichtjahre erstrecken und ausgedehnte Leerräume umgeben, die »Voids«. Aufwändige Computersimulationen zeigen, dass die Schwerkraft, die auf anfängliche Fluktuationen der kosmischen Materiedichte wirkte, dieses Muster nicht allein hervorbrachte – auch die Dunkle Energie prägte es nachhaltig. Anders sind die Berechnungen jedenfalls nicht mit Beobachtungen der Galaxienverteilung in Einklang zu bringen.

Astronomen überrascht das kaum. Schließlich haben sich Filamente und Leerräume ja nicht von der kosmischen Expansion abgelöst; im Gegensatz zu Planeten und Galaxien sind sie keine durch die Schwerkraft gebundenen Strukturen. Vielmehr beruht ihre Gestalt auf dem Kräftemessen der Anziehungskraft mit der kosmischen Expansion. Über große Entfernungen hinweg halten sich diese erstaunlich genau die Waage. Würde man die Materie gleichmäßig im Universum verteilen, erhielte man ebenfalls eine Massendichte von ungefähr $10^{-26}$ Kilogramm pro Kubikmeter. Dominiert die Dunkle Energie, würden die Leerräume im Universum stärker anwachsen; überwöge die Materie, wären die Filamente deutlicher ausgeprägt.

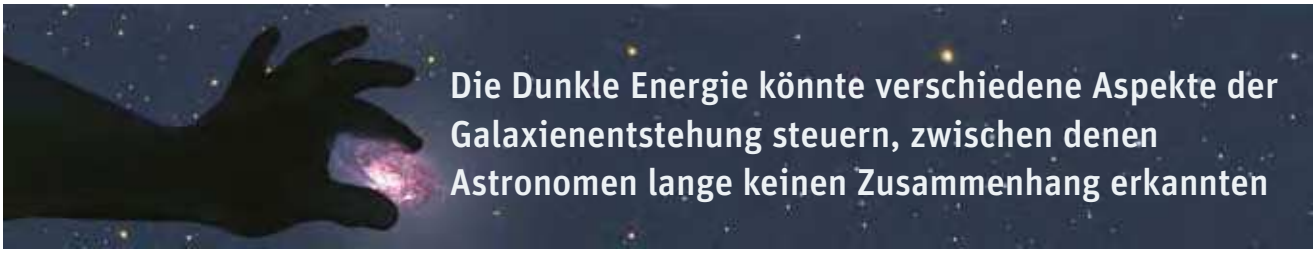
Auf der kürzeren Längenskala von Galaxien und Galaxienhaufen ist die Situation komplizierter. Galaxienhaufen sind die größten durch die Schwerkraft gebundenen Objekte im Universum: Ansammlungen von Tausenden von Galaxien, die in riesige Wolken aus heißem Gas eingebettet sind. Die Schwerkraft bestimmt auch die Struktur von Spiralgalaxien wie unserem Milchstraßensystem, in denen sie mit dem Drehimpuls der in ihnen enthaltenen Materie ein Gleichgewicht bildet. Um zu wachsen, müssen sie Gas aus dem intergalaktischen Raum aufnehmen oder mit anderen Welteninseln verschmelzen.

Galaxien und Galaxienhaufen sind von der kosmischen Expansion abgekoppelt. Deshalb klingt es zunächst abwegig, dass die Dunkle Energie ihr Schicksal beeinflussen soll. Und doch gilt diese immer mehr als Schlüssel, der zuvor für unabhängig gehaltene Eigenschaften der Welteninseln miteinander verbindet. Als entscheidend erweist sich dabei, dass Kollisionen und Verschmelzungen bestimmen, wie sie sich entwickeln. Die Dunkle Energie wirkt sich darauf entscheidend aus.

Warum das so ist, folgt aus der gegenwärtigen Theorie der Galaxienentstehung. Diese setzt voraus, dass es zwei Klassen kosmischer Materie gibt. Gut vertraut ist uns die gewöhnliche Materie, deren Elementarteilchen sowohl leicht miteinander wechselwirken als auch, sofern sie elektrisch geladen sind, mit der elektromagnetischen Strahlung. Astronomen nennen sie baryonische Materie, weil ihr Hauptbestandteil Baryonen sind, wie beispielsweise Protonen und Neutronen. Noch immer rätselhaft ist hingegen das Wesen der so genannten Dunklen Materie, die 85 Prozent der Materie im Kosmos ausmacht. Zwar treten ihre Teilchen nicht mit elektromagnetischer Strahlung in Wechselwirkung – deshalb gilt sie als dunkel. Doch zerrt sie über ihre Schwerkraft an der sichtbaren, baryonischen Materie und verrät sich dadurch indirekt.

Da sie vom intensiven Strahlungsfeld des jungen Universums unabhängig war, konnten Dichteschwankungen der Dunklen Materie bereits kurz nach dem Urknall zu sphärischen Strukturen anwachsen, die Astronomen als Halos bezeichnen. Den Baryonen erging es anders: Sie waren mit dem Strahlungsfeld gekoppelt und blieben zunächst unverdichtet in einem Zustand, der dem eines heißen Gases ähnelte. Erst als das expandierende Universum abkühlte, strömte die baryonische Materie in die bereits existierenden Halos der Dunklen Materie und verdichtete sich dort zu den ersten Sterne und Galaxien.

Seit den 1980er Jahren haben Theoretiker diesen Prozess mit Computern im Detail simuliert, darunter die Forscher-



**Die Dunkle Energie könnte verschiedene Aspekte der Galaxienentstehung steuern, zwischen denen Astronomen lange keinen Zusammenhang erkannten**

## In Kürze

- Die Dunkle Energie gilt als wahrscheinlichste **Ursache der beschleunigten Expansion des Universums**, auf die Beobachtungen ferner Supernovae und Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung hindeuten.
- Weniger bekannt ist, dass die Dunkle Energie auch das Schicksal der Materie im Universum mitbestimmt. Sie trug zur **Entstehung filamentartiger Strukturen** in der großräumigen Verteilung der Materie bei und bewirkte womöglich, dass Galaxienhaufen seit etwa sechs Milliarden Jahren nicht weiter anwachsen.
- Indem sie die **Häufigkeit galaktischer Zusammenstöße** senkte, prägte sie auch die Entwicklung von Galaxien. So fror vermutlich die relative Häufigkeit der verschiedenen Galaxientypen in den letzten sieben Milliarden Jahren ein.

gruppen von Simon D.M. White am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching und Carlos S. Frenk an der Universität Durham in England. Den Simulationen zufolge waren die ersten Strukturen im Kosmos kleine, relativ massearme Halos aus Dunkler Materie. Auf Grund der hohen Dichte im frühen Universum verschmolzen diese – mitsamt den in ihnen enthaltenen Galaxien – zu größeren, massereicheren Systemen. Galaxien entstanden demnach in einem Bottom-up-Prozess, der vom Kleinen zum Großen verlief – ähnlich dem Bau von Spielzeughäusern aus Bausteinen. (Ein Top-down-Prozess verläuft umgekehrt vom Großen zum Kleinen; dabei würde man zunächst ein Spielzeughaus zerstören, um seine Bausteine zu erhalten.)

Gemeinsam mit meinen Kollegen überprüfte ich diese Modelle, indem wir rekonstruierten, wie Galaxien im Verlauf der kosmischen Entwicklung miteinander verschmolzen. Wir wussten, dass die Welteninseln dabei ihre ursprünglichen Formen verlieren. Die frühesten Galaxien, die wir heute sehen können, existierten bereits, als das Universum etwa eine Milliarde Jahre alt war. Dass sich Verschmelzungen damals viel häufiger ereigneten als heute, erkennen wir an den unregelmäßigen Formen dieser jungen Galaxien, die häufig zwei Kerne aufzuweisen.

## Seltenere Zusammenstöße

Im Lauf der Zeit vereinigten sich große Galaxien immer seltener. Zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall war noch jedes zweite massereiche System in einen kosmischen Zusammenstoß verstrickt, vier Milliarden Jahre später fast keines mehr. Die relative Häufigkeit der verschiedenen Formen großer Galaxien fror ein. Im heutigen Universum sind 98 Prozent der Galaxien elliptisch oder spiralförmig und weisen damit Formen auf, die beim Verschmelzen zerstört würden. Diese Objekte sind dynamisch stabil und bestehen überwiegend aus alten Sternen. Sie müssen also vor langer Zeit entstanden sein – und haben sich seitdem morphologisch nicht verändert. Die meisten der wenigen Galaxien, die noch heute verschmelzen, sind massearm.

Darüber hinaus wurden im Lauf der kosmischen Geschichte in Galaxien immer weniger Sterne geboren. Der Großteil heute existierender Sterne entstand bereits in der ersten Hälfte der kosmischen Geschichte. Dieser Nach- ▷

## Hinweise auf die Dunkle Energie

NASA / ESA, HUBBLE KEY PROJECT TEAM / HIGH-Z SUPERNOVA SEARCH TEAM

### Entfernte Supernovae

Im expandierenden Universum wächst die Fluchtgeschwindigkeit zwischen Galaxien mit ihrem Abstand an. Astronomen können das mit hellen Sternexplosionen bis in große Entfernungen verfolgen. Aus deren Spektren lesen sie die Rotverschiebung der Spektrallinien ab und schließen so auf die Geschwindigkeit; ihre Helligkeit im Maximum verrät die Entfernung. Messungen entfernter Supernovae zeigen, dass die Expansionsrate des Kosmos früher geringer war – die Ausdehnung hat sich beschleunigt.

### Hintergrundstrahlung

Karten der kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen ein Muster von Flecken, die kühler beziehungsweise wärmer sind als der Mittelwert. Aus deren Winkelgröße am Himmel können Forscher auf die Geometrie des Universums schließen und daraus seine Energiedichte ableiten. Der gemessene Betrag lässt sich nicht allein mit Materie erklären; eine bislang unbekannte Komponente muss die Lücke schließen. Darüber hinaus wird das Fluktuationsmuster der Hintergrundstrahlung von den Schwerefeldern kosmischer Strukturen auf eine Weise verformt, die ebenfalls vom Verlauf der Expansion abhängt. Messungen stimmen mit Vorhersagen überein, die Theoretiker unter Berücksichtigung der Dunklen Energie machen.

### Verteilung der Galaxien

Welteninseln sind nicht zufällig im All verteilt, sondern in großen Strukturen angeordnet. Eine davon ähnelt dem Muster der in der Hintergrundstrahlung erkennbaren Temperaturschwankungen – ein Hinweis auf die Energiedichte des Universums und die Existenz der Dunklen Energie.

### Gravitationslinsen

Kosmische Schwerkraftfelder lenken das Licht entfernter Objekte ab. Befindet sich eine Lichtquelle hinter einer solchen Gravitationslinse, können Mehrfachbilder entstehen. Das ist umso wahrscheinlicher, je größer das Universum ist – was wiederum vom Wirken der Dunklen Energie abhängt. Mit Messungen dieses Effekts können Astronomen das Wachstum kosmischer Materiehäufungen studieren. Auch darin hinterlässt die Dunkle Energie ihre Spuren.

### Galaxienhaufen

Mit Röntgenbeobachtungen können Forscher verfolgen, wie die Masse von Galaxienhaufen im Lauf der Zeit anwuchs. Ohne die Dunkle Energie wären die Messungen nicht zu deuten.

▷ weis gelang in den 1990er Jahren Arbeitsgruppen von Simon J. Lilly, damals an der Universität Toronto, Piero Madau, damals am Space Telescope Science Institute in Baltimore und Charles C. Steidel vom California Institute of Technology in Pasadena. Neueren Messungen zufolge endete die Sternentstehung in massereichen Galaxien recht früh. In den vergangenen sieben Milliarden Jahren, also der zweiten Hälfte der bisherigen Geschichte des Kosmos, wurden Sterne vor allem in massearmen Systemen geboren (siehe SdW 3/2005, S. 50, und SdW 7/2006, S. 52).

Das erscheint widersinnig, denn schließlich besagt doch die Theorie der Galaxienentstehung, dass kleine Systeme zuerst entstanden und zu größeren verschmolzen. Seltsam ist auch, dass sich das Wachstum der massereichen Schwarzen Löcher in den Galaxienzentren dramatisch verlangsamte. Im heutigen Universum sind helle Quasare selten und die Schwarzen Löcher in den Zentren des Milchstraßensystems und ihrer Nachbarn ruhig.

## Kräftemessen kosmischer Energien

Zwar erklären sich einige Astronomen den Abfall der Sternentstehungsrate allein mit Vorgängen innerhalb der Galaxien, etwa der von den zentralen Schwarzen Löchern und Supernovae ausgesandten Strahlung. Das verrät jedoch nicht, warum Galaxien gleichzeitig seltener verschmolzen. Dass die Dunkle Energie damals gerade zur dominierenden Kraft im Kosmos wurde, macht ihren Einfluss plausibel.

Bis vor etwa sieben Milliarden Jahren war die Materiedichte so groß, dass die Gravitationskräfte zwischen Galaxien über den Einfluss der Dunklen Energie dominierten und Kollisionen bewirkten. Der Zusammenprall von Gaswolken in den Galaxien löste neue Sterngeburten aus, Gas gelangte in die Zentren der Welteninseln und ließ dort die massereichen Schwarzen Löcher anwachsen. Doch der Raum expandierte weiter, die Materiedichte sank und damit auch die Anziehungskräfte zwischen den Galaxien.

Mit der Zeit verschob sich das Kräfteverhältnis zwischen anziehender Materie und Dunkler Energie, bis die zeitweilige Verlangsamung der Expansion in eine Beschleunigung umschlug. Großräumige Strukturen, in denen sich die Galaxien befanden, wurden auseinandergezerrt, Verschmelzungen allmählich seltener. Auch die Rate, mit der intergalaktisches Gas in die Galaxien einfiel, nahm ab. Von diesem Nachschub abgeschnitten, wurden die Schwarzen Löcher in den Zentren inaktiv.

Dieser Ablauf legt nahe, warum sich die Sternentstehung von massereichen zu

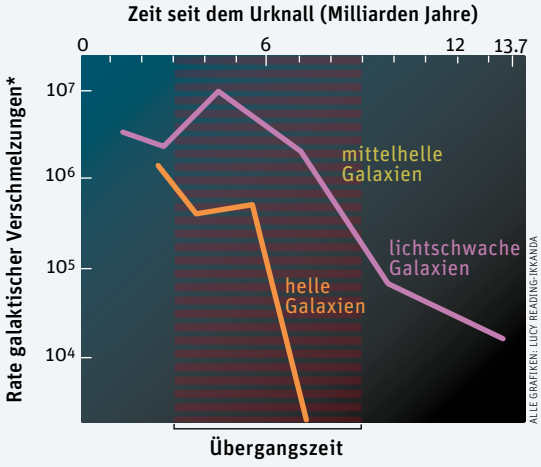
## Im Griff der Dunklen Energie

**Kurz nach dem Urknall** bildeten sich die ersten Strukturen im Universum – doch bereits nach etwa sieben Milliarden Jahren froren diese ein. Anfangs war die Rate galaktischer Kollisionen hoch und in den Galaxien wurden viele Sterne geboren. Die Aktivität ebbte ausgerechnet dann ab, als sich die kosmische Expansion beschleunigte. Ein Zufall?

### Das Ende galaktischer Verschmelzungen

Sechs Milliarden Jahre nach dem Urknall verschmolzen leuchtkräftige, massereiche Galaxien kaum noch miteinander. Auch masseärmere, leuchtschwache Welteninseln kollidierten immer seltener.

* Verschmelzungen pro Milliarden Jahre pro Kubik-Gigaparsec. Ein Gigaparsec sind eine Milliarde Parsec oder 3,26 Milliarden Lichtjahre.

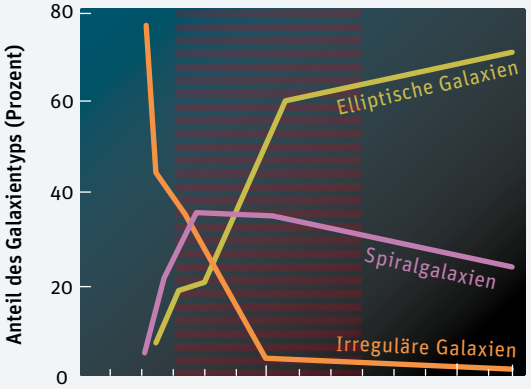



ALLE GRAFIKEN: LUCY READING-IKKANDA

NASA / ACS SCIENCE & ENGINEERING TEAM

### Eingefrorene Formen

Im frühen Kosmos hatten die Galaxien keine regelmäßige Gestalt – häufige Zusammenstöße verhinderten das. Erst als diese seltener auftraten, änderte sich die Häufigkeit von elliptischen und spiralförmigen Galaxien nicht mehr.



NASA / ESA · HUBBLE HERITAGE TEAM

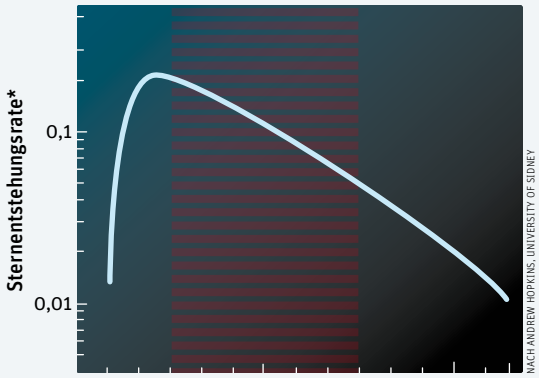
massearmen Welteninseln verlagerte. Massereiche Halos aus Dunkler Materie mitsamt den darin enthaltenen Galaxien treten stärker gehäuft auf als masseärmere – sie können eher zusammenstoßen und verschmelzen. Das löst »Starbursts« aus, Phasen intensiver Sternbildung. Bald explodieren massereiche Sterne als Supernovae, heizen das Gas in ihrer Umgebung auf und verhindern, dass weitere Sonnen entstehen. Die Sternentstehung erstickt sich selbst. Gedämpft wird sie aber auch durch die zentralen Schwarzen Löcher. Diese werden beim Zusammenstoß der Welteninseln mit Gas gefüttert und zu intensiver Aktivität angeregt: Gebündelte Materiestrahlen, so genannte Jets, wühlen ihre Umgebung auf, erhitzen das Gas und verhindern, dass es abkühlt und zu Sternen kollabiert.

Ist die Sternentstehung in einer massereichen Galaxie erst einmal unterbrochen, scheint sie nicht wieder aufzu- ▷

### Verebbte Sternentstehung

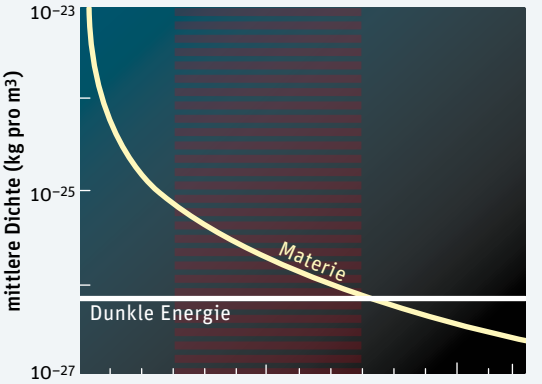
Das frühe Universum war ein Hexenkessel intensiver Sternentstehung in den Galaxien – doch nachdem sie schnell ihren Höhepunkt erreichte, fiel sie immer weiter ab.

* Sonnenmassen pro Kubik-Megaparsec. Ein Megaparsec sind eine Million Parsec oder 3,26 Millionen Lichtjahre.



### Dominanz der Dunklen Energie

Eine gemeinsame Ursache könnte diese Entwicklung prägen: die Verdünnung der Materie auf Grund der kosmischen Expansion. Als die Dichte der Materie unter die der Dunklen Energie fiel (hier als konstant angenommen), beschleunigte sich die Ausdehnung. Galaxien wurden schneller auseinandergetrieben, kollidierten seltener und nahmen weniger Gas auf, aus dem neue Sterne entstanden.

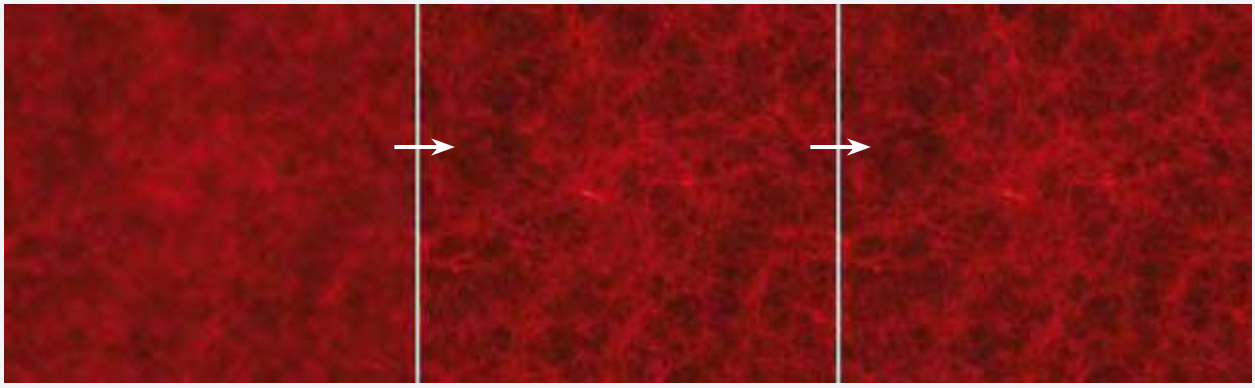


## Das Universum im Computer

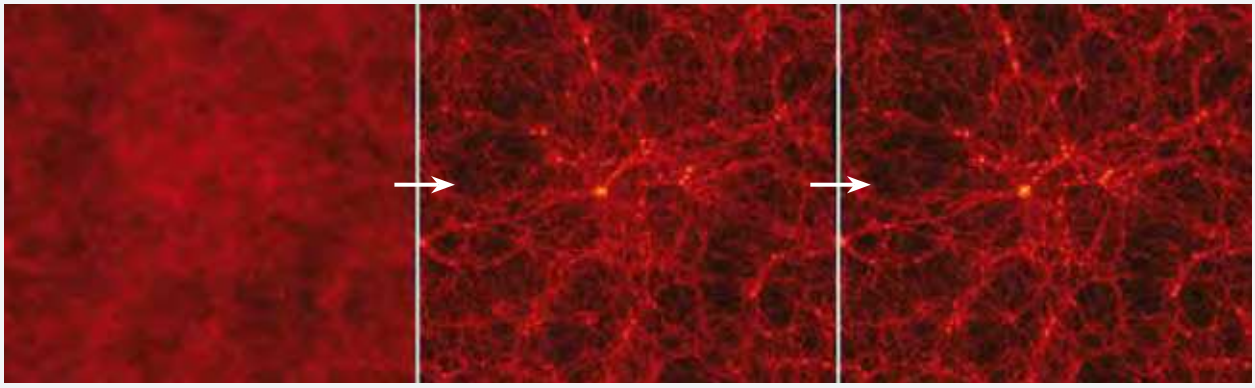
**Simulationen verraten,** wie die Zusammensetzung des Kosmos seine Geschichte prägt. Gäbe es mehr Dunkle Energie, hätte die beschleunigte Expansion früher eingesetzt und die Materie schneller verdünnt; große Strukturen wären nicht entstanden. Im Fall von weniger Dunkler Energie wäre die Schwerkraft länger dominierend.

Jeder Kasten zeigt eine würfelförmige Region mit einer Kantenlänge von einer Milliarde Lichtjahren. Darin befinden sich 27 Millionen Teilchen, die jeweils einer Galaxie entsprechen. Von der Dunklen Energie wird angenommen, dass sie in Raum und Zeit konstant ist. Der Parameter $\Omega_\Lambda$ beschreibt ihre Dichte.

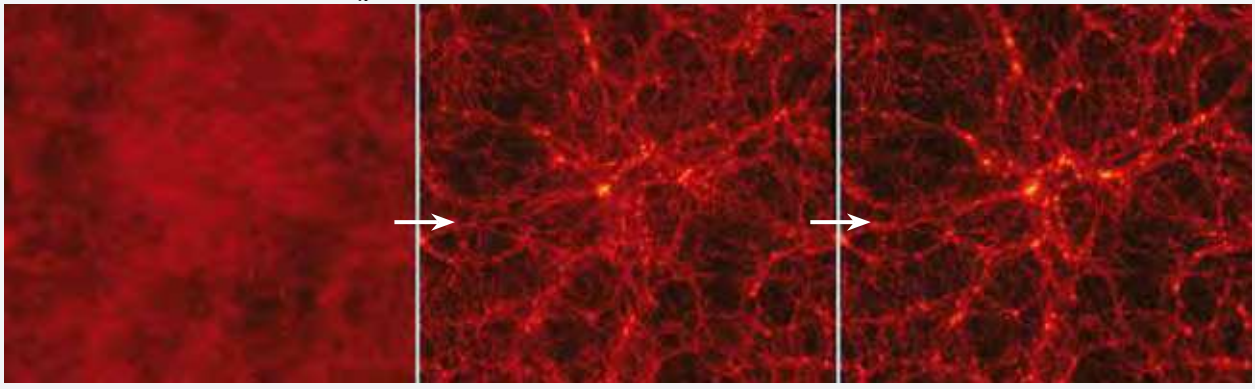
**Universum mit mehr Dunkler Energie als gemessen ($\Omega_\Lambda$ = 0,99)**



**Universum mit dem gemessenen Anteil Dunkler Energie ($\Omega_\Lambda$ = 0,75)**



**Universum ohne Dunkle Energie ($\Omega_\Lambda$ = 0)**

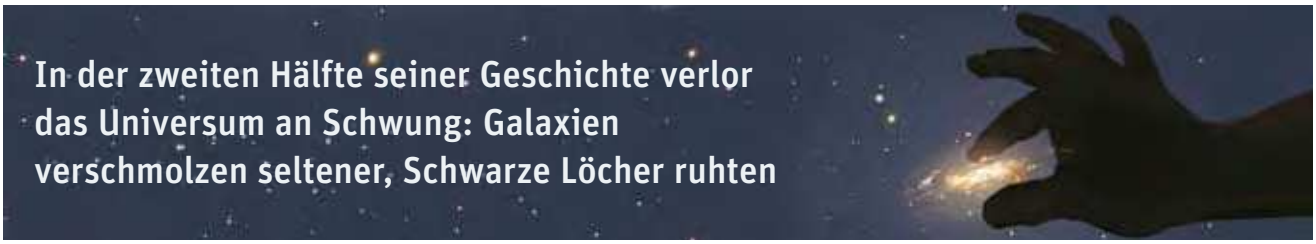


L. GAO, C. FRENK, A. JENKINS, INSTITUTE FOR COMPUTATIONAL COSMOLOGY, DURHAM UNIVERSITY

**Junges Universum:** Bei einem Sechstel seiner heutigen Größe war die Materie in allen drei Szenarien gleichmäßig verteilt. Die Dunkle Energie machte sich noch nicht bemerkbar.

**Die Schlüsselepoche:** Als das Universum drei Viertel seiner heutigen Größe hatte, waren die Auswirkungen der Dunklen Energie dramatisch. Ein hoher Anteil hätte die Entstehung großräumiger Strukturen verhindert (oben). In den beiden anderen Fällen können sich deutliche Filamente ausbilden.

**Heutiges Universum:** Im Fall des tatsächlich beobachteten Gehalts an Dunkler Energie ist das Wachstum großräumiger Strukturen abgeschlossen, die Filamente sind eingefroren (Mitte). In einem Universum ohne Dunkle Energie wachsen sie weiter (unten).



**In der zweiten Hälfte seiner Geschichte verlor das Universum an Schwung: Galaxien verschmolzen seltener, Schwarze Löcher ruhten**

▷ flammen. Entweder enthalten diese Objekte dafür zu wenig Gas oder das vorhandene Gas ist zu heiß, um schnell genug abzukühlen. Zwar können auch diese großen Welteninseln verschmelzen, das geschieht jedoch »trocken«, ohne Geburt vieler neuer Sterne. Entgegen dieser Stagnation verschmelzen kleinere Galaxien bis heute, dabei sind schwächere Starbursts nicht selten. Massereiche Galaxien scheinen demzufolge früher ihre endgültigen Formen anzunehmen als massearme – womöglich geprägt durch die Dunkle Energie, welche die Häufung massereicher Halos und deren Verschmelzungsrate bestimmt.

Damit stimmt auch die Entwicklung der Galaxienhaufen überein. Als das Universum halb so alt war wie heute, hatten diese Strukturen bereits ihre heutige Masse erreicht. In den folgenden acht Milliarden Jahren wuchsen sie kaum weiter an. Der Einfall weiterer Galaxien in die Haufen endete, als die Dunkle Energie die Expansion des Universums zu dominieren begann. Mitte der 1990er Jahre bemerkten einige Astronomen eine Stagnation des Haufenwachstums. Das erklärten sie sich zunächst damit, dass die Materiedichte in den vergangenen acht Milliarden Jahren niedriger war, als die Theorie vorhersagte. Wird die Dunkle Energie berücksichtigt, löst sich dieser scheinbare Widerspruch auf.

Unsere Lokale Gruppe, die Ansammlung des Milchstraßensystems, der Andromeda-Galaxie und ihrer Nachbargalaxien, illustriert, wie die Dunkle Energie auf unsere kosmische Umgebung einwirkt. Bis vor wenigen Jahren dachten die Astronomen, die Lokale Gruppe würde in den nahen Virgo-Galaxienhaufen stürzen. Doch dazu wird es nicht kommen, denn die Dunkle Energie treibt die beiden Haufen auseinander. Außerdem wäre ohne sie nicht zu verstehen, dass die Bewegungen der einzelnen Galaxien in unserer kosmischen Nachbarschaft nur geringfügig von einem linearen Expansionsgesetz abweichen. Demzufolge scheint sich die Dunkle Energie auf Dimensionen von 30 Millionen Lichtjahren bemerkbar zu machen.

In einem von der Dunklen Energie dominierten, beschleunigten Universum ergeben sich die beobachteten Veränderungen in der Galaxienpopulation zwanglos. Ohne die Dunkle Energie hätten sich Galaxien über einen längeren Zeitraum miteinander vereinigt. Dann enthielte das Universum heute viel mehr massereiche Galaxien mit Populationen alter Sterne. Massearme Galaxien wären hingegen seltener, genauso wie Spiralgalaxien (darunter unser Milchstraßensystem), denn galaktische Kollisionen zerstören die Spiralstruktur. Großräumige Strukturen wären stärker gebunden, Galaxien würden häufiger verschmelzen.

## Abstoßende Zukunft

Wäre die Dunkle Energie jedoch stärker als beobachtet, träten Kollisionen seltener auf und es gäbe dementsprechend weniger massereiche Galaxien und Galaxienhaufen. Spiralgalaxien und massearme Zwergsysteme wären häufiger, Galaxienhaufen jedoch masseärmer – falls sie existierten. Wahrscheinlich wären viel weniger Sterne entstanden und ein größerer Teil der baryonischen Materie des Kosmos wäre noch immer gasförmig.

Obwohl sich die Dunkle Energie nahtlos in eine konsistente Entwicklungsgeschichte einzufügen scheint, ist diese damit noch längst nicht bewiesen. Dass bestimmte Phänomene gleichzeitig geschehen, belegt schließlich nicht ihren kausalen Zusammenhang. Einen Schritt voran verspricht eine Reihe neuer Durchmusterungen, die gegenwärtig mit den Weltraumteleskopen Hubble, Chandra und Spitzer sowie großen erdgebundenen Teleskopen unternommen werden. Unter anderem soll dabei für viele Galaxien ermittelt werden, wann sie zuletzt mit anderen verschmolzen.

Wie die Welteninseln entstehen, beeinflusst auch unsere eigene Existenz. Nur in Sternen entstehen Elemente, die schwerer als Lithium sind, und ohne diese Elemente gäbe es weder erdähnliche Planeten noch Lebewesen. Eine Galaxie, in der nur wenige Sterne geboren werden, könnte sie kaum hervorbringen.

Einerseits hat die Dunkle Energie die Vergangenheit des Kosmos tief greifend geprägt und wirkt auch in der Zukunft weiter. Sie wird dem Leben nützen, indem sie etwa verhindert, dass das Universum schrumpft und in einem Kollaps endet. Andererseits birgt sie gewissermaßen auch Risiken, denn sie treibt die Galaxien immer schneller auseinander, sodass die Lokale Gruppe schließlich zu einer isolierten Oase in den leeren Weiten des Kosmos wird. Die Wirkung der Schwerkraft wird sich dann immer mehr auf die unmittelbare Nähe massereicher Objekte wie Galaxien und Sterne beschränken.

Ihr Wesen ist noch weit gehend unerforscht, doch nach den Mutmaßungen einiger Theoretiker könnte die Dunkle Energie so dramatisch anwachsen, dass sie Objekte zerreißt, die bislang durch die Schwerkraft gebunden waren, darunter Galaxienhaufen, Galaxien und sogar Planetensysteme. In ferner Zukunft würde sie unsere Erde von der Sonne fortreißen und dann zerfetzen – mit allem, was sich auf ihr befindet, schließlich sogar ihre Moleküle und Atome. ◁

**Christopher J. Conselice** ist Dozent für Astronomie an der Universität Nottingham. Zuvor arbeitete er als Postdoc am California Institute of Technology in Pasadena.



AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Das fast unendliche Universum: Grenzfragen der Kosmologie. Von Joseph Silk. München 2006

The extravagant universe: exploding stars, dark energy, and the accelerating cosmos. Von Robert P. Kirshner. Princeton 2004

A direct measurement of major galaxy mergers at z < 3. Von Christopher J. Conselice et al. in: Astronomical Journal, Bd. 126, S. 1183, 2003

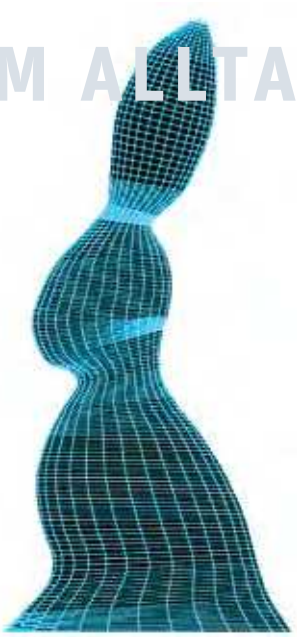
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/866413.

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

RABBIT PROTOTYPING

# Ostern kommt immer so plötzlich

Computerunterstützte Verfahren verkürzen die Produktionszyklen in der Schokoladenindustrie.



**Computer Aided Design, also die rechnergestützte Konstruktion, baut eine Hasenhohlform aus geometrischen Elementen auf, in diesem Beispiel aus Rechtecken. Für das Rabbit Prototyping muss dieses digitale Modell so umgerechnet werden, dass ein aus Schichten aufgebautes reales Objekt hergestellt werden kann.**

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Vorbei die Zeiten, da schon im Advent die Hasenproduktion begann und zu Ostern die ersten Nikoläuse vom Band liefen. Zum Glück: Ärzte klagen schon lange, dass Beschäftigte der Schokoladenindustrie häufig unter zeitlicher Desorientierung leiden. Künftig werden Hasen just in time gefertigt. Denn eine neuartige Klasse von Techniken wird die gesamte Produktionskette drastisch verkürzen: Rabbit Prototyping.

Um das Ziel einer durchgängig computerunterstützten Chocolaterie zu erreichen, wurde das Fraunhofer-Institut für Mehl- und Süßspeisen (IMS) in Castrop-Rauxel beauftragt, verfügbare Techniken auf ihre Eignung zu prüfen. Das für eine Hochtechnisierung erforderliche Marktvolumen ist zweifellos gegeben, immerhin verzehrt jeder Deutsche durchschnittlich 8,94 Kilogramm Schokolade und Schokoladenwaren (Angabe für 2005). Alljährlich stehen weit über hundert Millionen Osterhasen und eine nur wenig kleinere Zahl von Weihnachtsmännern zur gegebenen Zeit in den Regalen.

Schon länger werden neue Produkte oder Varianten beliebter Klassiker wie der Goldhase mit Glöckchen mittels CAD-Software am Monitor konstruiert. Doch künftig sollen nicht mehr Modellbauer oder computergesteuerte Fräsmaschinen diese Entwürfe in räumliche Objekte umsetzen, um Design, Passgenauigkeit und Eignung für weiterverarbeitende Prozessschritte zu prüfen. Schneller und kosteneffizienter arbeiten laut IMS Verfahren, die aus den Konstruktionsdaten zunächst spezielle digitale Modelle und daraus automatisch solche aus Kunststoff oder anderen Materialien generieren.

**Das älteste dieser Verfahren wurde bereits in den 1980er Jahren** entwickelt – die Stereolithografie (nach dem griechischen *stereos* für »räumlich« und der Lithografie als Drucktechnik). Ein Laserstrahl belichtet entsprechend dem digitalen Modell die Oberfläche eines flüssigen Kunstharzes. Dadurch härtet eine Schicht von 0,05 bis 0,5 Millimeter Dicke aus (siehe Grafik rechts). Sie wird abgesenkt und mit frischem Harz benetzt, die nächste Schicht kann entstehen. Auf diese Weise lassen sich Objekte mit Kantenlängen von mehr als siebzig Zentimetern aus Acrylaten und Epoxiden erzeugen.

Ähnlich funktioniert das Lasersintern, nur sind die Ausgangsmaterialien pulverförmige Polyamide, Metalle oder Keramiken. Die winzigen Partikel werden auf einer Plattform fein verteilt. Der Laser schmilzt die Oberflächen der Körner an und verbackt diese miteinander. Beide Verfahren erfordern Raffinesse bei der Planung, denn durch die thermischen Vorgänge entstehen auch mechanische Spannungen, die Objekte können beispielsweise schrumpfen und so die Anforderungen an die Genauigkeit von Maß und Form verletzen.

Selbst beim Lasersintern dauert der Prozess Stunden, bei großen Teilen und hohen Präzisionsanforderungen sogar Tage. Noch langsamer allerdings geht es mit Verfahren wie dem Lasergenerieren oder dem Laser Melting, bei dem die Pulverkörner komplett aufgeschmolzen werden. Lediglich acht Kubikzentimeter pro Stunde sind keine Seltenheit.

Osterhasen wie Nikoläuse sind Hohlformen aus Schokolade, die Wandstärken liegen bei zwei bis drei Millimetern. Zu ihrer Fertigung dienen zweiteilige Werkzeuge aus Kunststoff, die anhand der Modelle gebaut werden. Über eine kleine Öffnung wird die bei etwa 35 Grad Celsius verflüssigte Schokolade eingefüllt, dann wird das Ganze einige Minuten lang in allen Raumrichtungen sowie jeweils um die eigene Achse geschleudert, bis die Schokolade die Innenseite gut auskleidet. Dabei wird sie allmählich steif, in einem Kühltunnel dann fest. Das Produkt kann entnommen und beispielsweise mit bedruckter Staniolfolie umhüllt werden.

Stereolithografie und Lasersintern eignen sich sehr gut für die Modellentwicklung. Ist nur eine Kleinserie gefragt – etwa eine limitierte Auflage nach Entwürfen bekannter Künstler –, lassen sich damit sogar die Werkzeuge kostengünstig herstellen. Für die Entwicklung bei Großserien bieten sich Lasergenerieren und Laser Melting an.

Langfristig könne laut IMS der Osterhase sogar direkt aus den CAD-Daten gefertigt werden, etwa mittels Schmelzschichtung, im Englischen Fused Deposition Modeling: Eine computergesteuerte und frei fahrbare Düse extrudiert aufgeschmolzene Schokomasse. Diese erstarrt und die nächste Schicht kommt darüber (siehe Grafik rechts). Vorläufig ist dieser Prozess noch zu aufwändig, allenfalls ließen sich individuell nach den Wünschen betuchter Kunden gestaltete Leckereien damit realisieren.

Angesichts dieser bahnbrechenden Entwicklung sollen auch andere Branchenvertreter Interesse geäußert haben. Die Verfahren könnten als Rapid Prototyping in der Automobil- und Konsumgüterindustrie sowie in der Medizintechnik Anwendung finden.

**Klaus-Dieter Linsmeier** ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«. Der Autor dankt der Fraunhofer-Allianz Rapid Prototyping und dem Infozentrum Schokolade des Süßwarenverbands.

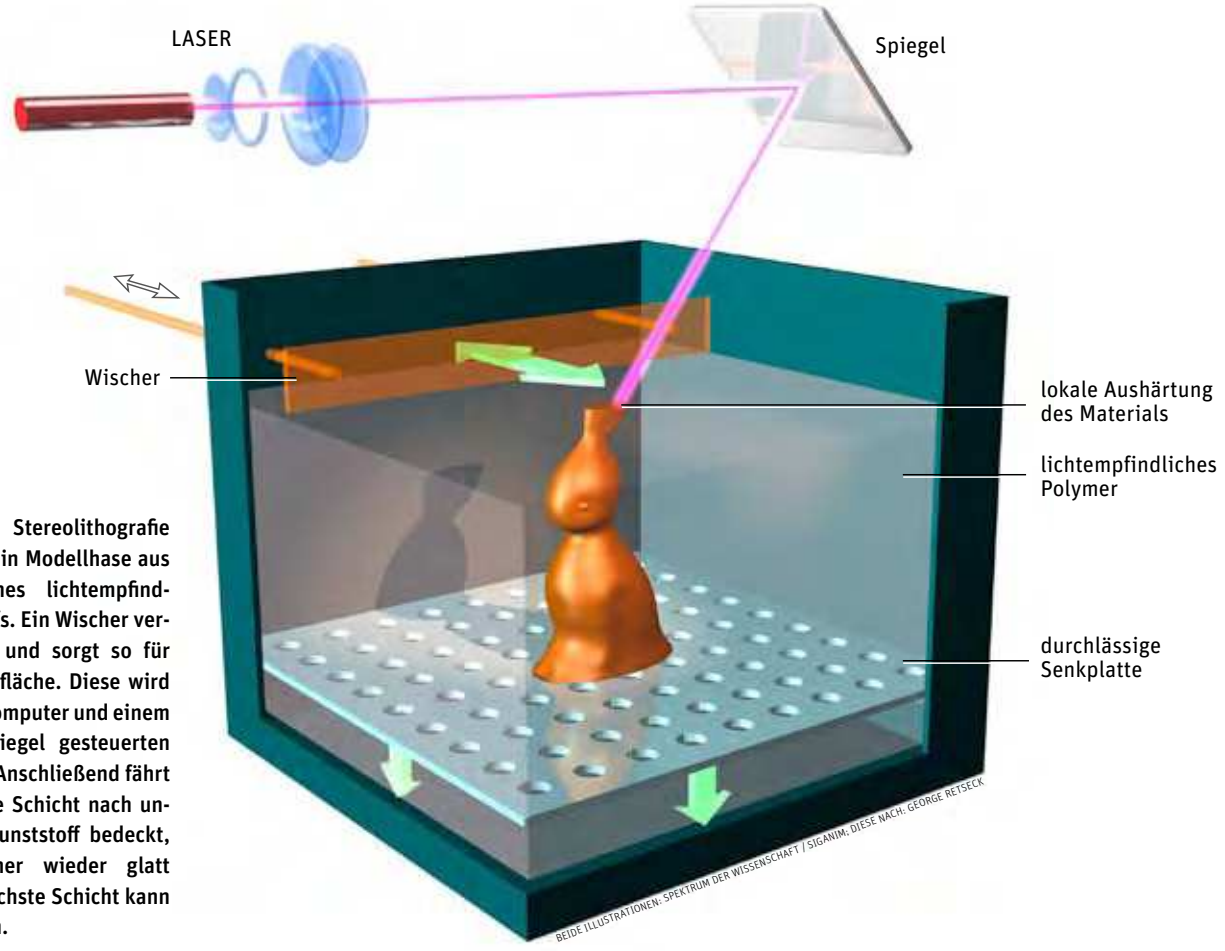
## Wussten Sie schon?

▶ Für das **Rabbit Prototyping in einer Büroumgebung** – etwa bei einem freien Foliendesigner – eignet sich das Multi Jet Modeling: Schmelzfähige Kunststoffe werden über die Düsen eines Druckkopfs – ähnlich wie Farben beim Tintenstrahldrucker – schichtweise ausgegeben und gehärtet. Einen Druckkopf verwendet auch das 3D Printing. Dieser spritzt ein Bindemittel zum Beispiel in Zellulosepulver.

▶ Das **Kakaoaroma entsteht durch Fermentation**, Trocknen und Rösten der Bohnen. Mahlwerke reißen das Zellgewebe auf und erhöhen gleichzeitig durch Reibung die Temperatur. Die Kakaobutter wird freigesetzt, schmilzt und verbindet Stärke- und Eiweißmoleküle zur Kakaomasse. Wird die Butter ausgepresst, bleibt ein fester Kuchen zurück, der zu Trinkkakao zermahlen wird. Mischt man hingegen Kakaobutter, Zucker, Sahne- oder Milchpulver hinzu, erhält man eine knetfähige Schokoladenmasse. Pflanzliches Lezithin erhöht die Fließfähigkeit, Vanille und gelegentlich auch Zimt runden das Aroma ab. Immer feinere Walzwerke und schließlich das Conchieren – ein Knetprozess, bei dem die Kakaobutter erneut aufgeschmolzen wird – ergibt schließlich den zarten Schmelz der Schokolade.

▶ **Kakaobohnen liefern den Stoff,** aus dem die Naschträume sind. Es sind die Samen von Bäumen, die im feuchtwarmen Klima der Äquatorländer wachsen. Im Jahr 2004 belief sich die Ernte weltweit auf 3,5 Milliarden Tonnen, davon stammte aber mehr als die Hälfte aus Afrika. Neunzig Prozent der Ernte entfällt auf den Konsumkakao Forastero, während die Criollo genannte Sorte Edelkakao liefert.

▶ Der Name **Kakao leitet sich vom aztekischen Xocoatl ab:** Der spanische Konquistador Hernando Cortez hatte die Bohnen bei der Heimfahrt im Gepäck. In Mittelamerika waren sie hochgeschätzt, dienten sogar als Zahlungsmittel. Doch das Getränk daraus entsprach nicht dem europäischen Geschmack. Tatsächlich bedeutet *xococ* sauer oder herb. Erst das Versetzen mit Honig oder Rohrzucker verhalf dem Kakao zur Akzeptanz.




BEIDE ILLUSTRATIONEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM; DIESE NACH: GEORGE RETSECK

**Bei der Stereolithografie entsteht ein Modellhase aus Monomeren eines lichtempfindlichen Kunststoffs. Ein Wischer verteilt die Masse und sorgt so für eine glatte Oberfläche. Diese wird von einem per Computer und einem beweglichen Spiegel gesteuerten Laser belichtet. Anschließend fährt die ausgehärtete Schicht nach unten, wird von Kunststoff bedeckt, den der Wischer wieder glatt streicht – die nächste Schicht kann belichtet werden.**

# SPIEGELNEURONEN II

FOTO: CARY WOLINSKY; BEARBEITUNG: JEN CHRISTIANSEN

In Spektrum 3/2007 erschien SPIEGELNEURONEN I: Spiegel im Gehirn

# Der blinde Spiegel Autismus

Die Schädigung eines Neuronensystems, das die Aktionen anderer widerspiegelt, ist vermutlich eine Ursache für Autismus. Aus dieser Theorie könnten neue Methoden für Diagnose und Therapie des rätselhaften Leidens hervorgehen.

Von Vilayanur S. Ramachandran und Lindsay M. Oberman

Auf den ersten Blick fällt einem oft nichts Besonderes auf, wenn man einem Jungen mit Autismus begegnet. Doch sobald man mit ihm zu reden versucht, wird schnell klar, dass etwas ganz und gar nicht stimmt. Er meidet den Blickkontakt, zappelt unruhig herum, wiegt den Körper vor und zurück oder schlägt sogar mit dem Kopf gegen die Wand. Zu einem normalen Gespräch ist ein Autist meist überhaupt nicht fähig. Obwohl er Gefühle wie Angst, Wut und Glück zu erleben vermag, fehlt es ihm an echtem Einfühlungsvermögen, und subtile soziale Signale, welche die meisten Kinder mühelos auffangen, entgehen ihm völlig.

In den 1940er Jahren entdeckten der amerikanische Psychiater Leo Kanner und der österreichische Kinderarzt Hans Asperger unabhängig voneinander diese Entwicklungsstörung, unter der rund 0,5 Prozent aller Kinder leiden. Obwohl keiner der beiden Forscher von der Arbeit des anderen wusste, gaben sie dem Syndrom denselben Namen: Autismus, nach dem griechischen Wort *autos* für selbst.

Der Name passt gut, denn das auffälligste Merkmal ist eine starke Beeinträchtigung des sozialen Interaktionsverhaltens – gleichsam ein totaler Rückzug auf das eigene Selbst. Später haben Ärzte den Begriff Autismusspektrumstörung eingeführt, um zu verdeutlichen, dass das Leiden viele Varianten mit höchst unterschiedlichem Schweregrad hat, denen aber gewisse charakteristische Symptome gemeinsam sind.

Wodurch wird es verursacht? Die Forscher wissen, dass die Anlage dafür vererbbar ist, obwohl auch die Umwelt eine Rolle zu spielen scheint (siehe »Autismus« von Patricia M. Rodier, Spektrum der Wissenschaft 5/2000, S. 56). Seit Ende der 1990er Jahre untersuchen Forscher an der Universität von Kalifornien in San Diego (U.C.S.D.), ob die Krankheit mit einer neu entdeckten Klasse von Nervenzellen im Gehirn zusammenhängt, den so genannten Spiegelneuronen. Da diese Neuronen offenbar an Fähigkeiten wie dem Einfühlungsvermögen und dem Wahrnehmen der Intentionen anderer beteiligt sind, lag die Vermutung nahe, eine Fehlfunktion des Spiegelneuronensystems könnte manche Symptome des Autismus verursachen. In den letzten Jahren haben mehrere Studien Indizien für diese Theorie erbracht. Weitere Untersuchungen werden vielleicht erklären, wie Autismus entsteht, und somit den Ärzten bessere Diagnose- und Behandlungsmethoden liefern.

**Kinder mit Autismus haben vielleicht deshalb Schwierigkeiten, ihre Mitmenschen zu verstehen, weil ihre Spiegelneuronen nicht richtig funktionieren.**

## Rätselhafte Symptome

Als wichtigste Anzeichen gelten soziale Isolation, das Vermeiden von Blickkontakt, geringe Sprachkompetenz und fehlendes Einfühlungsvermögen, doch außerdem treten andere, weniger bekannte Symptome auf. Viele Autisten haben Probleme mit dem Verstehen von Metaphern und nehmen sie oft wörtlich. Außerdem fällt es ihnen schwer, die Handlungen anderer zu imitieren. Oft beschäftigen sie sich übertrieben mit Lappalien, ignorieren aber wichtige Aspekte ihrer Umgebung, insbesondere ihrer sozialen Umwelt. Ebenso seltsam ist, dass sie oft eine extreme Abneigung ge- ▷

▷ gen bestimmte Geräusche haben, die sie ohne ersichtlichen Grund erschrecken.

Die Erklärungsansätze lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: anatomische und psychologische. Eine dritte Gruppe von Theorien, die einer lieblosen Kindheit die Schuld geben – Stichwort »Kühlschrankmutter« –, gilt heute als widerlegt. Wie der Anatom Eric Courchesne von der U.C.S.D. und andere Forscher zeigen konnten, weist das Kleinhirn, das für die Koordination komplexer willkürlicher Muskelbewegungen zuständig ist, bei autistischen Kindern charakteristische Abnormitäten auf. Dennoch wäre der Schluss voreilig, eine Schädigung des Kleinhirns sei die einzige Ursache für Autismus. Wird das kindliche Kleinhirn durch einen Schlaganfall geschädigt, so beobachtet man normalerweise Muskelzittern, unsicheren Gang und abnorme Augenbewegungen – Symptome, die bei Autisten selten sind. Umgekehrt tritt bei Patienten mit Kleinhirnschädigung kein einziges der für Autismus typischen Symptome auf. Vielleicht sind die bei autistischen Kindern beobachteten Veränderungen im Kleinhirn eher Nebeneffekte abnormer Gene, die das Leiden auf ganz andere Weise bewirken.

Die wohl klügste psychologische Theorie haben Uta Frith vom University College London und Simon Baron-Cohen von der Universität Cambridge aufgestellt. Demnach sind Autisten vor allem unfähig, eine so genannte *theory of mind* zu konstruieren, das heißt, sich in das Innenleben ihrer Mitmenschen hineinzuversetzen. Nach Frith und Baron-Cohen ermöglichen uns spezielle neuronale Schaltkreise im Gehirn, detaillierte Hypothesen darüber aufzustellen, was im Kopf anderer Menschen vorgeht. Diese Hypothesen wiederum erlauben uns brauchbare Vorhersagen über das Verhalten anderer.

Frith und Baron-Cohen sind offensichtlich auf der richtigen Spur, aber ihre Theorie vermag die scheinbar unzusammenhängenden Symptome des Autismus nicht vollständig zu erklären. Wer sagt, dass Autisten nicht sozial interagieren können, weil ihnen eine *theory of mind* fehlt, beschreibt eigentlich nur die Symptome mit anderen Worten. Die Forscher müssen vielmehr diejenigen Hirnvorgänge identifizieren, die bei Autisten gestört sind.

**Spiegelneuronen erfüllen offenbar genau die Funktion, die bei Autismus so schwer gestört ist**

Einen entscheidenden Hinweis lieferte die Arbeit von Giacomo Rizzolatti und seinen Kollegen an der Universität Parma (Italien); sie untersuchten in den 1990er Jahren die Nerventätigkeit im Gehirn von Makaken, während die Tiere zielgerichtete Handlungen ausführten (siehe »Spiegel im Gehirn« von Giacomo Rizzolatti, Leonardo Fogassi und Vittorio Gallese, Spektrum der Wissenschaft 3/2007, S. 48). Seit Jahrzehnten ist bekannt, dass bestimmte Neuronen im prämotorischen Cortex – einem Teil des Frontallappens – bei der Steuerung willkürlicher Bewegungen eine Rolle spielen. Zum Beispiel feuert ein Neuron, wenn der Affe nach einer Erdnuss greift, ein anderes, wenn er einen Hebel zieht, und so weiter. Diese Gehirnzellen werden oft als Motoneuronen bezeichnet. Wohlgemerkt steuert das Neuron, dessen Aktivität jeweils aufgezeichnet wird, den Arm nicht allein; es gehört vielmehr zu einem ganzen Schaltkreis, dessen Funktion anhand der Signale der einzelnen daran beteiligten Nervenzellen verfolgt werden kann.

Überraschenderweise wurden manche Motoneuronen auch dann aktiv, wenn der Affe bloß jemandem bei derselben Handlung zusah. Zum Beispiel feuerte ein Neuron, das an der Steuerung des Griffs nach der Erdnuss beteiligt war, wenn der Affe beobachtete, dass ein Artgenosse dieselbe Bewegung ausführte. Wie bildgebende Verfahren in der Folge zeigten, gibt es diese so genannten Spiegelneuronen auch in entsprechenden Regionen der menschlichen Hirnrinde. Demzufolge senden Spiegelneuronen – oder genauer gesagt die Netzwerke, denen sie angehören – nicht nur motorische Befehle, sondern befähigen Affen wie Menschen, die Intentionen anderer Individuen herauszufinden, indem sie deren Handlungen mental simulieren. Bei Affen beschränkt sich diese Gabe wahrscheinlich auf das Vorwegnehmen einfacher zielgerichteter Handlungen, aber beim Menschen könnten die Spiegelneuronen die Fähigkeit entwickelt haben, komplexere Intentionen zu interpretieren.

## Emotionale Ansteckung

Wie sich später herausstellte, finden sich Spiegelneuronen auch in anderen Teilen der menschlichen Hirnrinde wie dem Gyrus cinguli und der Insel (Insula). Sie spielen möglicherweise eine Rolle bei emotionaler Ansteckung: Bei wachen Versuchspersonen feuern manche Neuronen im vorderen cingulären Cortex, die typischerweise auf Schmerz reagieren, auch dann, wenn die Person jemand anderen beobachtet, der offensichtlich unter Schmerzen leidet. Spiegelneuronen könnten auch an der Nachahmung mitwirken; Menschenaffen scheinen diese Fähigkeit in rudimentärer Form zu besitzen, während sie beim Menschen am deutlichsten auftritt. Die Gabe muss zumindest teilweise angeboren sein: Andrew Meltzoff von der Universität Washington hat gezeigt, dass ein neugeborenes Baby, dem man die Zunge zeigt,

## In Kürze

- Da **Spiegelneuronen** offenbar für das Verstehen der Mitmenschen wichtig sind, könnte ein Defekt dieses neuronalen Systems einige Hauptsymptome des Autismus erklären – zum Beispiel soziale Isolation und fehlendes Einfühlungsvermögen.
- An **Autisten** lässt sich mangelnde Aktivität der Spiegelneuronen in mehreren Hirnarealen beobachten. Gezielte Therapien könnten diese Aktivität vielleicht wiederherstellen und einige Symptome abschwächen.
- Eine ergänzende Hypothese namens **Salience-Landscape-Theorie** erklärt sekundäre Symptome wie Überempfindlichkeit durch die Unfähigkeit von Autisten, Wichtiges von Unwichtigem zu unterscheiden.

dasselbe tut. Da das Baby seine eigene Zunge nicht zu sehen vermag, kann es diese Fähigkeit nicht durch visuelles Feedback und Fehlerkorrektur gelernt haben. Stattdessen muss es im Gehirn des Kindes einen fertigen Mechanismus geben, der das Erscheinungsbild der Mutter – ob sie nun gerade die Zunge herausstreckt oder breit lächelt – auf die Motoneuronen abbildet.

## Unterdrückte Hirnwellen

Auch die kindliche Sprachentwicklung erfordert eine gewisse Abbildung zwischen Hirnarealen. Um die Worte von Vater oder Mutter zu imitieren, muss das Gehirn des Kindes auditive Signale, die in den Hörzentren der Schläfenlappen verarbeitet werden, in verbalen Output des motorischen Cortex umwandeln. Zwar ist noch nicht bekannt, ob Spiegelneuronen an diesem Vorgang direkt beteiligt sind, aber offensichtlich muss ein analoger Prozess stattfinden. Und schließlich brauchen Menschen vermutlich die Spiegelneuronen, um sich selbst mit den Augen anderer zu sehen – eine Voraussetzung für Selbstbewusstsein und Introspektion.

Was hat all dies mit Autismus zu tun? In den späten 1990er Jahren bemerkte unser Team an der U.C.S.D., dass Spiegelneuronen anscheinend just die Funktionen ausüben, die bei Autismus gestört sind. Wenn das Spiegelneuronensystem tatsächlich an der Interpretation von komplexen Intentionen mitwirkt, sollte ein Zusammenbruch dieses neuronalen Schaltkreises das auffälligste Defizit von Autisten erklären: fehlende soziale Kompetenz. Auch andere Hauptsymptome wie fehlende Empathie, Sprachstörungen oder schlechtes Imitieren würde man erwarten, wenn die Spiegelneuronen nicht funktionieren. Andrew Whittens Gruppe an der University of St Andrews (Schottland) kam ungefähr gleichzeitig mit uns auf diese Idee, aber die ersten experimentellen Indizien lieferte unser Labor zusammen mit Eric L. Altschuler und Jamie A. Pineda von der U.C.S.D.

Um die Fehlfunktion der Spiegelneuronen bei autistischen Kindern zu zeigen, mussten wir einen Weg finden, die Aktivität der Nervenzellen abzuleiten, ohne Elektroden im Gehirn zu platzieren, wie Rizzolatti und seine Kollegen das bei ihren Affen getan hatten. Wir erkannten, dass dafür ein Elektroenzephalogramm (EEG) ausreicht, das die Hirnwellen der Kinder über äußere Messfühler aufzeichnet. Wie Hirnforscher seit über einem halben Jahrhundert wissen, wird eine Komponente des EEG, die so genannte My-Welle (sprich mü, nach dem griechischen Buchstaben μ), jedes Mal unterdrückt, wenn eine Person eine willkürliche Muskelbewegung ausführt – zum Beispiel ihre Hand öffnet und schließt. Interessanterweise wird diese Komponente auch dann blockiert, wenn die Person einer anderen bei der gleichen Handlung zusieht. Einer von uns (Ramachandran) und Altschuler hatten daher die Idee, die Unterdrückung der My-Wellen könnte einen simplen, nichtinvasiven Zugang zur Aktivität der Spiegelneuronen liefern.

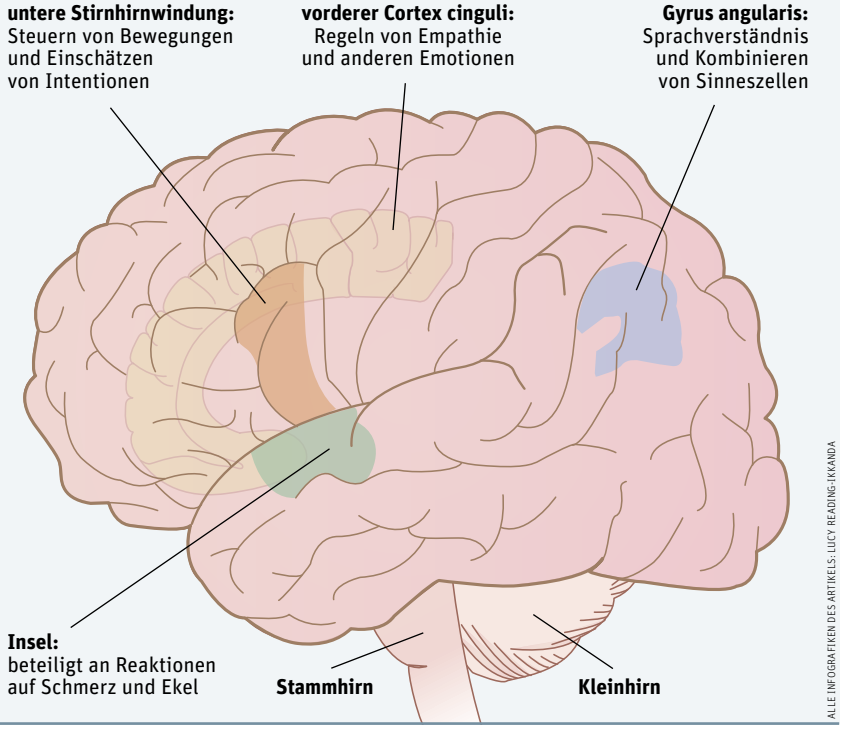
Wir beschlossen, unsere ersten Experimente auf ein »hochfunktionales« autistisches Kind – das heißt auf eines ohne schwere kognitive Behinderungen – zu konzentrieren. Sehr kleine, kognitiv schwer gestörte Kinder schienen uns für diese Studie nicht geeignet, weil wir Effekte ausschließen wollten, die bloß von Aufmerksamkeitsdefiziten, Verständnisproblemen oder allgemeiner Entwicklungsverzögerung herrührten.

Das EEG des autistischen Kindes zeigte eine beobachtbare My-Welle, die unterdrückt wurde, wenn es eine einfache Bewegung ausführte – genau wie bei einem Gesunden. Wenn das Kind jedoch jemand anderen beim Ausführen der Handlung beobachtete, trat die Unterdrückung nicht auf. Daraus schlossen wir, dass zwar das motorische Befehlssystem des Kindes funktionierte, nicht aber sein Spiegelneuronensystem. Dieses Resultat, das unsere Hypothese überzeugend bestätigte, präsentierten wir im Jahr 2000 beim Jahrestreffen der Society for Neuroscience.

Freilich darf man einen Einzelfall nicht verallgemeinern. Darum führten wir später eine systematische Serie von ▷

## Die Anatomie des Autismus

**Autisten zeigen reduzierte Aktivität** der Spiegelneuronen in der unteren Stirnhirnwindung (Gyrus frontalis inferior), einem Teil des prämotorischen Cortex. Das erklärt vielleicht ihre Unfähigkeit, die Absichten anderer zu verstehen. Defekte Spiegelneuronen in der Insel und dem vorderen Gyrus cinguli könnten verwandte Symptome verursachen, etwa fehlendes Einfühlungsvermögen. Defekte im Gyrus angularis führen möglicherweise zu Sprachstörungen. Bei Autisten treten außerdem strukturelle Veränderungen im Kleinhirn und im Stammhirn auf.



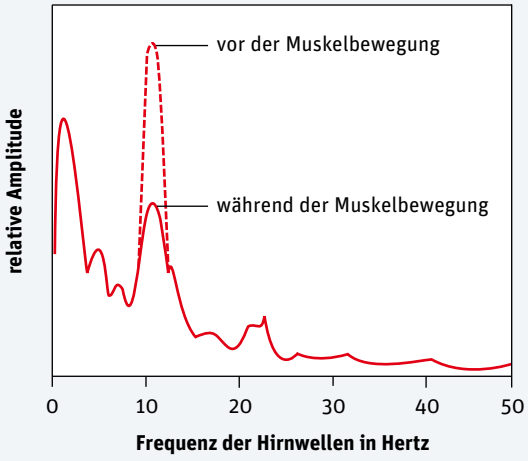

ALLE INFOGRAFIKEN DES ARTIKELS: LUCY READING-IKKANDA

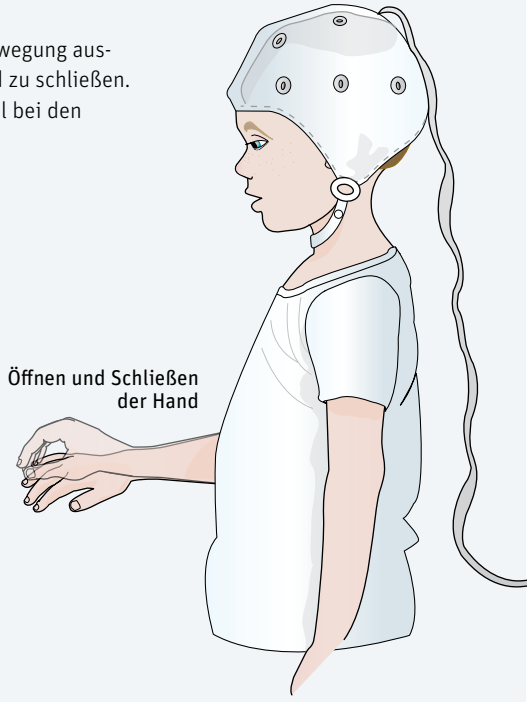
## Aufschlussreiche My-Wellen

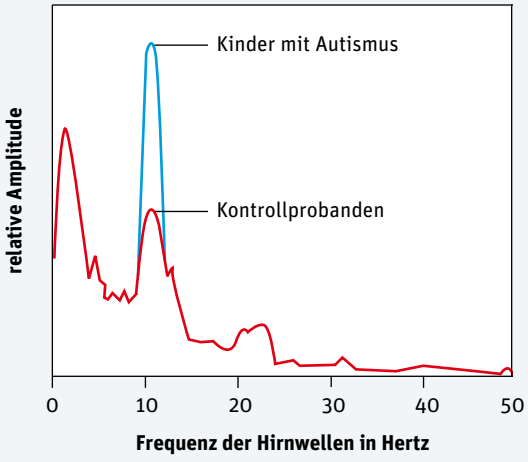
**Um das Spiegelneuronensystem bei Autisten zu untersuchen,** nutzten Forscher die Beobachtung, dass beim Feuern von Neuronen im prämotorischen Cortex die so genannten My-Wellen unterdrückt werden. Dabei handelt es sich um eine Komponente der Hirnaktivität, die im Elektroenzephalogramm (EEG) als Frequenzspitze bei 8 bis 13 Hertz erscheint. Die Forscher verglichen die My-Wellen von autistischen Kindern mit denen einer Kontrollgruppe, während die Probanden willkürliche Muskelbewegungen ausführten und dann dieselben Aktionen auf einem Bildschirm betrachteten.

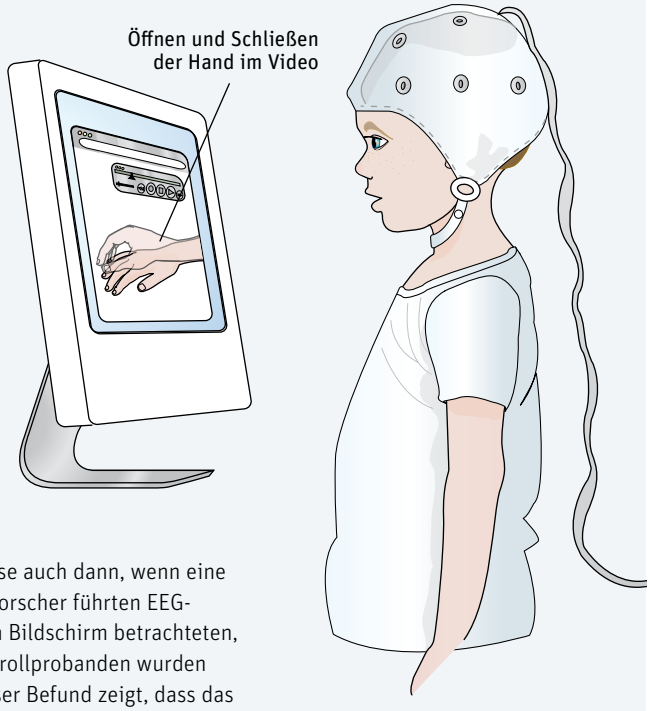
### Aktives Handeln

Motoneuronen feuern immer dann, wenn eine Person eine willkürliche Muskelbewegung ausführt. Alle Versuchspersonen wurden aufgefordert, die rechte Hand zu öffnen und zu schließen. Wie erwartet unterdrückte diese Handlung die Amplitude der My-Wellen – sowohl bei den Kindern mit Autismus als auch bei den Kontrollprobanden.




### Beobachtetes Handeln

Die Spiegelneuronen im prämotorischen Cortex feuern normalerweise auch dann, wenn eine Person einer anderen beim Ausführen einer Handlung zusieht. Die Forscher führten EEG-Messungen der Hirnaktivität durch, während die Testpersonen einen Bildschirm betrachteten, auf dem sich eine Hand öffnete und schloss. Die My-Wellen der Kontrollprobanden wurden unterdrückt (rot), doch die der autistischen Kinder nicht (blau). Dieser Befund zeigt, dass das Spiegelneuronensystem der autistischen Kinder defekt ist.

▷ Experimenten durch, wobei zehn hochfunktionale Testpersonen mit Autismusspektrumstörung einer zehnköpfigen Kontrollgruppe passenden Alters und Geschlechts gegenüberstanden. Wir sahen die erwartete Unterdrückung der My-Wellen, wenn die Kontrollprobanden ihre Hand bewegten – und wenn ihnen per Video eine sich bewegende Hand vorgeführt wurde. Hingegen zeigten die EEGs der Autisten die My-Unterdrückung nur, wenn sie die eigene Hand bewegten.

Andere Forscher haben unsere Ergebnisse mit unterschiedlichen Techniken zur Beobachtung der Nerventätigkeit bestätigt. Ein Team um Riitta Hari von der Technischen Hochschule Helsinki (Finnland) fand Spiegelneuronendefizite bei autistischen Kindern mit Hilfe der Magnetenzephalografie, welche die von elektrischen Strömen im Gehirn erzeugten Magnetfelder misst. Kürzlich zeigte Mirella Dapretto von der Universität von Kalifornien in Los Angeles mittels funktioneller Magnetresonanztomografie bei Autisten eine geringere Aktivität der Spiegelneuronen im präfrontalen Cortex. Hugo Théoret von der Universität von Montreal (Kanada) nutzte die transkranielle Magnetstimulation, bei der elektrische Ströme im motorischen Cortex induziert werden, um Muskelbewegungen auszulösen. Während bei den Kontrollprobanden die induzierten Handbewegungen ausgeprägter wurden, wenn sie Videos derselben Gesten betrachteten, war dieser Effekt bei den autistischen Testpersonen viel schwächer.

Alles in allem liefern diese Ergebnisse überzeugende Indizien dafür, dass bei Autisten das Spiegelneuronensystem nicht richtig funktioniert. Noch ist unbekannt, welche genetischen und umweltbedingten Risikofaktoren die Entwicklung von Spiegelneuronen hemmen, aber viele Forscherteams verfolgen nun diese Hypothese, weil sie Symptome – auch weniger bekannte – zu erklären vermag, die ausschließlich bei Autismus vorkommen. Forscher wissen zum Beispiel seit Langem, dass autistische Kinder oft Sprichwörter oder Metaphern missverstehen. Wenn wir zu einem Probanden sagten: »Halte dich zurück!«, nahm er das wörtlich und fasste sich an den Körper. Obwohl das Phänomen nicht bei allen Kindern mit Autismus vorkommt, schreit es nach einer Erklärung.

Um Metaphern zu verstehen, muss man fähig sein, für vordergründig unähnliche Dinge einen gemeinsamen Nenner zu finden. Nehmen wir den Buba-Kiki-Effekt, den der deutsch-amerikanische Psychologe Wolfgang Köhler vor gut sechzig Jahren entdeckte. Der Versuchsleiter zeigt Testpersonen zwei grob skizzierte Formen, eine gezackte und eine runde, und fragt: »Welche ist Buba und welche Kiki?« Unabhängig von der Sprache der Probanden wählen 98 Prozent für die runde Form Buba und für die gezackte Kiki.

## Buba klingt rund, Kiki wirkt spitz

Offenbar vermag das menschliche Gehirn abstrakte Eigenschaften von Formen und Klängen zu abstrahieren – zum Beispiel die Gezacktheit, die sowohl von der spitzigen Zeichnung als auch vom zackig klingenden Kiki verkörpert wird. Wie wir vermuten, hat dieses Abbilden zwischen unterschiedlichen Sinnesbereichen etwas mit Metaphern zu tun und setzt neuronale Schaltkreise von der Art des Spiegelneuronensystems voraus. Tatsächlich stellten wir fest, dass autistische Kinder beim Buba-Kiki-Test schlecht abschneiden: Sie stellen keinen Bezug zwischen Formen und Klängen her.

Doch welcher Teil des menschlichen Gehirns ist zuständig für diese Fähigkeit?

**Wir fanden überzeugende Indizien, dass bei Autisten die Spiegelneuronen nicht richtig funktionieren**

Als wahrscheinlicher Kandidat bietet sich der Gyrus angularis an. Er sitzt nicht nur strategisch günstig an der Kreuzung zwischen den Zentren für Sehen, Hören und Tastempfindung, sondern auch an einer Stelle, wo Nervenzellen nachgewiesen wurden, die wie Spiegelneuronen funktionieren. Als wir nichtautistische Personen mit Schädigungen in diesem Hirnareal untersuchten, fanden wir heraus, dass viele beim Buba-Kiki-Test versagen und auffallend schlecht Metaphern verstehen – genau wie Autisten.

Vermutlich hat sich das Abbilden zwischen unterschiedlichen Sinnesbereichen ursprünglich entwickelt, um den Primaten komplexe motorische Aufgaben zu erleichtern, etwa das Hangeln von Ast zu Ast, das ein äußerst rasches Verarbeiten visueller, auditiver und haptischer Information erfordert. Daraus ging schließlich wohl die Fähigkeit hervor, Metaphern zu bilden. Die Spiegelneuronen erlauben dem Menschen, nach den Sternen zu greifen, nicht nur nach Erdnüssen.

Die Entdeckung des Zusammenhangs zwischen Spiegelneuronen und Autismus eröffnet neue Möglichkeiten für Diagnose und Therapie. Zum Beispiel könnten Ärzte die fehlende Unterdrückung der My-Wellen – oder die Unfähigkeit, eine Mutter beim Zungezeigen zu imitieren – verwenden, um Autismus schon im frühesten Kindesalter zu diagnostizieren und möglichst rasch mit Verhaltenstherapie zu beginnen. Der frühe Zeitpunkt ist dabei entscheidend, denn Verhaltenstherapie wirkt viel weniger, wenn erst nach Auftreten der Hauptsymptome – meist im Alter zwischen zwei und vier – damit begonnen wird.

Eine noch interessantere Möglichkeit, um wenigstens die Symptome zu lindern, wäre Biofeedback. Ärzte würden dabei die My-Wellen eines autistischen Kindes ableiten und ihm auf einem Bildschirm vorführen. Falls die Funktion der Spiegelneuronen nicht komplett verloren ist, sondern nur ruht, könnte das Kind sie wiederbeleben, indem es – durch Versuch und Irrtum und visuelles Feedback – lernt, die My-Wellen auf dem Bildschirm zu unterdrücken. Unser Kollege Pineda verfolgt diesen Ansatz, und seine vorläufigen Ergebnisse sehen recht viel versprechend aus. Allerdings sollten solche Therapien die traditionelle Verhaltenstherapie nicht ersetzen, sondern ergänzen.

Ein anderer Therapieansatz sucht chemische Ungleichgewichte zu korrigieren, welche die Spiegelneuronen lähmen. Wie unsere Gruppe – mit den Studenten Mikhi Horvath und Mary Vertinsky – annimmt, verstärken spezielle Neuromodulatoren die Aktivität von Spiegelneuronen, die an emotionalen Reaktionen beteiligt sind. Nach dieser Hypothese könnte ein Mangel an solchen Substanzen das bei Autismus fehlende Einfühlungsvermögen erklären. Darum sollten ▷

▷ Forscher nach Verbindungen fahnden, die das Ausschütten der Neuromodulatoren stimulieren oder ähnlich auf Spiegelneuronen wirken. Ein Kandidat ist MDMA, besser bekannt als Ecstasy; es fördert bekanntlich emotionale Nähe und Verständigung. Vielleicht gelingt es, aus der Partydroge ein unschädliches und wirksames Medikament zu entwickeln, das wenigstens einige Symptome des Autismus lindert.

Solche Therapien können freilich nur eine gewisse Erleichterung bieten, denn andere Symptome lassen sich nicht mit der Spiegelneuronenhypothese erklären – zum Beispiel ständiges Wiederholen von Bewegungen, Vermeiden von Blickkontakt sowie Überempfindlichkeit, insbesondere gegen bestimmte Geräusche. Um diese Sekundärsymptome zu deuten, hat unsere Gruppe – zusammen mit William Hirstein vom Elmhurst College (US-Bundesstaat Illinois) und Portia Iversen von »Cure Autism Now«, einer gemeinnützigen Stiftung in Los Angeles – die so genannte »Salience-Landsape-Theorie« entwickelt (etwa: Theorie der Wichtigkeitslandschaft).

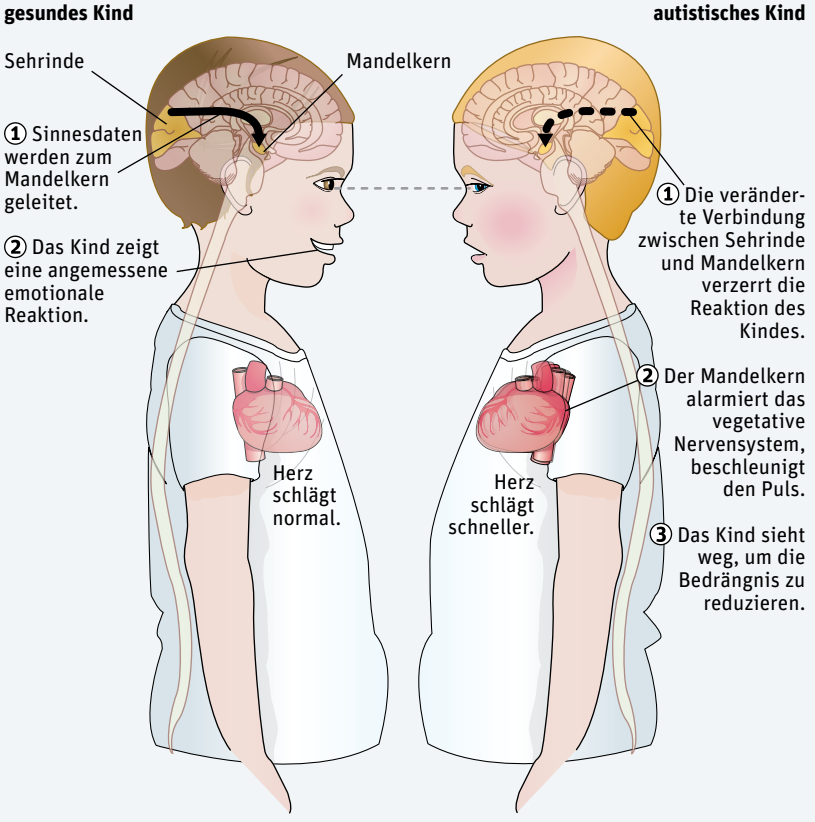
Die Umwelt konfrontiert den Menschen mit einer überwältigenden Menge unterschiedlichster Sinnesdaten. Nachdem die Informationsflut in den sensorischen Hirnarealen verarbeitet worden ist, wandert sie zum Mandelkern (Amygdala), der Pforte zum limbischen System, das die Emotionen steuert. Der Mandelkern nutzt gespeichertes Wissen, um zu bestimmen, wie die Person emotional reagieren soll – zum Beispiel mit Furcht beim Anblick eines Einbrechers, mit Begierde angesichts eines Liebhabers oder gleichgültig, wenn die Person etwas Unbedeutendes sieht. Von der Amygdala gelangen Signalkaskaden zum übrigen limbischen System und erreichen schließlich das vegetative Nervensystem, das den Körper auf Aktionen vorbereitet. Stellt der Mensch zum Beispiel einen Einbrecher, so beschleunigt sich sein Puls und der Körper beginnt zu schwitzen, um die durch Muskelanspannung erzeugte Wärme abzuleiten. Die vegetative Erregung wird wiederum dem Gehirn rückgemeldet, das die emotionale Reaktion verstärkt. Mit der Zeit erzeugt der Mandelkern eine Art Wichtigkeitslandschaft – eine Karte, welche die emotionale Bedeutsamkeit jedes Vorgangs in der individuellen Umwelt detailliert wiedergibt.

Unser Team fragte sich nun, ob diese Karte bei autistischen Kindern verzerrt ist. Vielleicht sind Verbindungen zwischen den Arealen der Hirnrinde, die Sinnesdaten verarbeiten, und dem Mandelkern gestört oder Nervenbahnen zwischen den limbischen Strukturen und den Frontallappen, die letztlich das Verhalten steuern. Infolge dieser Verbindungsdefekte könnte jedes belanglose Ereignis oder Objekt im Geist des Kindes eine extreme emotionale Reaktion – einen vegetativen Sturm – auslösen. Diese Hypothese würde erklären, warum solche Kinder nicht nur Blickkontakte meiden, sondern jede neue Empfindung: weil sie einen seelischen Aufruhr auszulösen droht. Gestörte Wahrnehmung des emotionalen Stellenwerts könnte auch der Grund sein, warum viele dieser Kinder sich intensiv mit Zugfahrplänen und anderen Kleinigkeiten abgeben, während sie für all die Dinge, welche die meisten Kinder faszinieren, keinerlei Interesse zeigen.

Eine gewisse Stütze für unsere Hypothese lieferten die vegetativen Reaktionen einer Gruppe von 37 autistischen Kindern, bei denen wir den Anstieg der Hautleitfähigkeit durch Schwitzen maßen. Im Gegensatz zur Kontrollgruppe war bei ihnen das Gesamtniveau der vegetativen Erregung höher. Die Autis-

## Die Salience-Landscape-Theorie

**Um gewisse sekundäre Autismussymptome zu erklären** – Überempfindlichkeit, Vermeiden von Blickkontakt, Abneigung gegen bestimmte Geräusche –, wurde die so genannte Salience-Landscape-Theorie entwickelt. Bei einem gesunden Kind wandern die Sinnesdaten zum Mandelkern, dem Tor zum limbischen System, das Emotionen verarbeitet. Der Mandelkern nutzt gespeichertes Vorwissen, um zu bestimmen, wie das Kind emotional auf jeden Reiz reagieren soll. Auf diese Weise entsteht eine Art Wichtigkeitslandschaft *(salience landscape)* der kindlichen Umwelt. Doch bei Kindern mit Autismus sind die Verbindungen zwischen den sensorischen Arealen und dem Mandelkern offenbar verändert; darum reagieren Autisten auf unbedeutende Ereignisse oder Objekte mit extremen Emotionen.



ten erregten sich vor allem, wenn sie mit unwichtigen Dingen und Ereignissen konfrontiert wurden, ignorierten jedoch häufig Reize, die in der Kontrollgruppe die erwarteten Reaktionen auslösten.

Wodurch wird die Wichtigkeitslandschaft eines Kindes derart verzerrt? Wie man weiß, hat fast jeder dritte Autist in früher Kindheit eine Schläfenlappen-Epilepsie erlitten – und da epileptische Anfälle oft unentdeckt bleiben, kommt wahrscheinlich eine hohe Dunkelziffer hinzu. Die Krampfanfälle könnten durch die wiederkehrenden Salven zufälliger Nervenimpulse, die das limbische System durchschießen, schließlich die Verbindungen zwischen der Sehrinde (visuellem Cortex) und dem Mandelkern durcheinanderbringen, indem sie manche Verbindungen verstärken und andere schwächen.

## Lässt sich die autistische Erregung dämpfen?

Bei Erwachsenen führt Schläfenlappen-Epilepsie zu ausufernden emotionalen Störungen, ohne die kognitiven Fähigkeiten radikal zu beeinträchtigen; doch bei Kindern richten die Anfälle vielleicht größeren Schaden an. Wie am Autismus scheinen auch am Risiko einer Schläfenlappen-Epilepsie in früher Kindheit sowohl genetische als auch Umweltfaktoren beteiligt zu sein. Beispielsweise könnten einige Gene anfälliger für Virusinfektionen machen – und diese wiederum für epileptische Anfälle.

Unsere Befunde über vegetative Reaktionen erklären möglicherweise die alte klinische Beobachtung, dass hohes Fieber manchmal die Symptome von Autismus vorübergehend abschwächt. Das vegetative Nervensystem ist an der Steuerung der Körpertemperatur beteiligt; da Fieber anscheinend von denselben neuronalen Bahnen reguliert wird wie die autistische Aufregung, vermag es sie vielleicht zu dämpfen.

Möglicherweise könnte die Salience-Landscape-Theorie auch begründen, warum autistische Kinder Bewegungen stereotyp wiederholen oder den Kopf gegen die Wand schlagen. Dieses Verhalten, so genannte Selbststimulation, dämpft irgendwie die vegetativen Unwetter im Kopf des Kindes. Wir fanden, dass Selbststimulation nicht nur beruhigend wirkt, sondern auch die Hautleitfähigkeit messbar reduziert. Daraus könnte sich eine Therapie für Symptome des Autismus ergeben. Hirstein entwickelt derzeit ein tragbares Gerät, das die Hautleitfähigkeit eines autistischen Kindes misst. Wenn das Gerät vegetative Erregung entdeckt, aktiviert es eine Art Druckweste, die sich sanft um den Körper des Kindes zusammenzieht und einen beruhigenden Druck ausübt.

Unsere beiden Hypothesen zur Erklärung der Symptome – Störung der Spiegelneuronen und verzerrte Wichtigkeitslandschaft – müssen einander nicht widersprechen. Dasselbe Ereignis, das die emotionalen Prioritäten eines Kindes durcheinanderbringt – gestörte Verbindungen zwischen limbischem System und übrigem Gehirn – schädigt vielleicht auch die Spiegelneuronen. Umgekehrt könnten die veränderten limbischen Verbindungen auch eine Nebenwirkung derselben Gene sein, welche die Defekte im Spiegelneuronensystem verursachen. Weitere Experimente sind nötig, um diese Mutmaßungen strengen Tests zu unterwerfen. Die tiefste Ursache des Autismus muss erst noch entdeckt werden. Bis dahin liefern unsere Spekulationen einen brauchbaren Rahmen für künftige Forschung. ◁

**Vilayanur S. Ramachandran** ist Direktor des Center for Brain and Cognition an der Universität von Kalifornien in San Diego. Er promovierte in Neurowissenschaften an der Universität Cambridge. Er erforschte nicht nur die Verbindung zwischen Autismus und Spiegelneuronen, sondern auch Phantomschmerzen und Synästhesien. **Lindsay M. Oberman** ist seit 2002 Doktorandin in Ramachandrans Team.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

A brief tour of human consciousness. Neuauflage. Von Vilayanur S. Ramachandran. Pi Press, 2005

EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. Von Lindsay M. Oberman et al. in: Cognitive Brain Research, Bd. 24, S. 190, 2005

Autonomic responses of autistic children to people and objects. Von William Hirstein, Portia Iversen und V. S. Ramachandran in: Proceedings of the Royal Society of London B, Bd. 268, S. 1883, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/866414

wichtige**online**adressen

**Datenauswertung und Messtechnik**
Sensoren, Verstärker, USB-Messkarten
Messprogramme, Auftragsmessungen
Instrumentierung von Prüfständen
**www.alles-messen.de**

**Der Ambulante Bibliotheksservice**
Inventarisierung, Katalogisierung
Wissen nutzen können !
**www.AraDet.de**

**Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI**
Entwicklung, Konstruktion, Technische Berechnung, Strömungsmechanik
**www.etastern.de**

**DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor**
Kontaktlinsen online bestellen
**www.dok.de**

**Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente**
**www.kernmechanik.de**

**Prometheus Wissenschaftsfernsehen: Livestream in TV-Qualität**
Tägliche Wissenschaftsnachrichten,
V-Tipps, TV-Tipps, Reportagen und Dokus
**www.prometheus.tv**

**Consulting für EU-Forschungsanträge im 7. Rahmenprogramm**
Energietechnik, Oberflächen,
Superisolationen, num. Modellierung
**www.haraldreiss.de**

**Zahnimplantate Krefeld-Zentrum**
Einzelzahnversorgung ab 1000,– Euro
**www.michael-eichbaum.de**

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de

NASA, VISIBLE EARTH

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

# Neuer Atem für marine Todeszonen

Ganze Küstenabschnitte im Meer werden durch menschliche Aktivitäten verwüstet, vor allem durch Abwässer aus Industrie und Landwirtschaft. Gibt es Chancen, diese Bereiche wieder neu zu beleben?

Von Laurence Mee

Man stelle sich einen Strand vor, überfüllt mit Badegästen, welche die heiße Sommersonne genießen. Doch während im flachen Wasser Kinder nach Muschelschalen und anderen Schätzen suchen, treiben sterbende oder tote Tiere an die Küste: anfangs nur ein paar Fische im Todeskampf, dann bald stinkende Haufen verrottender Krebse, Muscheln und anderes Getier. Von panischen Schreien ihrer Kinder alarmiert, zerren verängstigte Eltern ihren Nachwuchs vom Wasser weg. Zugleich tauchen am Horizont Boote auf, in denen frustrierte Fischer mit leeren Netzen in den Hafen zurückkehren.

Diese Szene stammt nicht etwa aus einem schlechten Horrorfilm. In den 1970er und 1980er Jahren kam es in mehreren rumänischen und ukrainischen Badeorten am Schwarzen Meer immer wieder zu ähnlichen Zwischenfällen. Fachleute schätzen, dass während dieser Zeit 60 Millionen Tonnen von am Boden lebenden Meerestieren (auch Benthos genannt) an Hypoxie eingingen. Hypoxie bedeutet, dass das Meerwasser in diesen Gebieten so wenig Sauerstoff enthält, dass dort höchstens noch Bakterien überleben können.

Auf dem Höhepunkt der Krise im Jahr 1990 breitete sich diese Todeszone im Nordwestteil des Schwarzen Meers, meerseitig der Donaumündung, über etwa 40 000 Quadratkilometer aus – ein Gebiet von der Größe der Schweiz. Auf der anderen Seite des Globus, im Golf von Mexiko, nahe der Mississippimündung, bildete sich in der Mitte der 1970er Jahre eine ähnliche Todeszone, die bis zu 21 000 Quadratkilometer überdeckte. In den letzten 20 Jahren wurden in der Nähe von Meeresküsten und Flussmündungen immer wieder solche toten oder verödeten Gebiete beobachtet (siehe Karte S. 52).

Seit ich in den frühen 1990er Jahren meinen ersten Artikel über die ökologische Krise im Schwarzen Meer schrieb, suche ich nach den Gründen solcher Zerstörungen. Wie kann man sie verhindern? Wie könnten solche Gebiete wiederbelebt werden? Einigen Kollegen gelang es, Prozesse zu identifizieren, die küstennahe Ökosysteme veröden lassen, und Maßnahmen zu entwickeln, mit denen sie renaturiert werden könnten.

Meeresforscher führen heute die Entstehung der meisten Todeszonen auf ein Phänomen zurück, das Eutrophierung genannt wird. Darunter versteht man die Überdüngung von Meeren mit Nährstoffen, die das Wachstum von Pflanzen fördern – das sind hauptsächlich solche, die Stickstoff und Phosphat enthalten.

Eine gewisse Menge dieses Düngers ist für das Wohlergehen des Phytoplanktons durchaus notwendig – insbesondere für freischwimmende Algen und andere Photosynthese betreibende Organismen, die im Meer am unteren Ende der Nahrungskette stehen. Auch Seegräser und Algen, die auf dem Grund von Flachmeeren wachsen, profitieren davon.

Zu viele dieser Nährstoffe im lichtdurchfluteten Wasser lassen allerdings Pflanzen allzu sehr wuchern, führen zu verheerenden Algenblüten und anderen unerwünschten Effekten. Die Pflanzen treten in die Nahrungskette ein, wenn ▷

RADU MIHNEA

**Mit den toten Fischen, die in den 1970er Jahren im Bereich der Donaumündung an die Küste des Schwarzen Meers trieben, bekamen Forscher die ersten Hinweise auf eine ökologische Todeszone. In der Satellitenaufnahme (links) vom Jahr 2000 sind im Westen deutlich Algenblüten erkennbar, Beleg für erhebliche Nährstoffzufuhr aus der Donau.**

NASA, VISIBLE EARTH, NACH: UNEP UND GEO JAHRBUCH 2003

▷ sie von winzigen Meerestieren, dem Zooplankton, Pflanzen fressenden Fischen oder filtrierenden Bodentieren wie Miesmuscheln und Austern gefressen werden. Auch wenn sie sterben, verrotten, auf den Boden sinken, von Bakterien zersetzt und schließlich Teil des Meeresbodens werden, sind sie Teil des Lebenszyklus. Von dieser organischen Substanz können sich wiederum andere Tiere wie Würmer, Garnelen oder Fische ernähren.

Normalerweise wird die Menge des Phytoplanktons begrenzt durch das Lichtangebot, verfügbare Nährstoffe und Abweidung. Reichern sich im Wasser Stickstoff und Phosphat an, so vermehren sich die kleinen photosynthetisch aktiven Organismen in großem Maßstab. Wucherndes Phytoplankton färbt das Wasser braun oder grün, mit der Folge, dass alle am Meeresboden lebenden Pflanzen bald im Schatten stehen und zu wenig Sonnenlicht abbekommen. Seegräser, die in flachen Buchten siedeln, werden dann von kleinen Algen bedeckt, woran sie letztendlich ersticken. Algen können auch Korallenriffe besiedeln, besonders dann, wenn durch Überfischung gerade die Organismen dezimiert wurden, die sonst die Algen abfressen.

## Zu viele Planktonblüten

Vermehren sich Phytoplankton und Aufsitzerpflanzen (fachlich: Epiphyten), so erschwert das zunehmend anderen Meeresorganismen das Leben. Doch noch bedrohlicher wird es, wenn in bodennahen Wasserschichten der Sauerstoffgehalt sinkt. Dieser reduziert sich, wenn dort Bakterien in größerem Umfang organisches Material zersetzen, das sich durch Überdüngung gebildet hat. Die meisten dieser toten pflanzlichen und tierischen Organismen sammeln sich am ohnehin schon sauerstoffarmen Meeresboden.

Ins Wasser gelangt der Sauerstoff entweder als Produkt der Photosynthese von Wasserpflanzen oder direkt aus der Luft durch physikalische Diffusion. Sobald der Meeresgrund mit toten Algen bedeckt ist und starke Dichteunterschiede in verschiedenen Wassertiefen verhindern, dass sich das Wasser mit sauerstoffreicherem Oberflächenwasser mischt, kann der Sauerstoff am Boden schnell aufgezehrt sein. Damit sterben alle dort lebenden Tiergemeinschaften ab. (Dichtegradienten können sich durch Unterschiede in der Temperatur oder im Salzgehalt bilden.) Diese grundlegende Abfolge – Planktonblüte durch Eutrophierung, erhöhte bakterielle Aktivität am Meeresboden, Sauerstoffschwund mit Pflanzen- und Tiersterben – haben Wissenschaftler in fast allen Todeszonen registriert.

Details hängen von den örtlichen biologischen und physikalischen Verhältnissen ab. Auch spielt der Nährstoffeintrag vom Land eine Rolle. Gering durchmischte Flussmündungen etwa (so genannte Ästuare) leiden besonders unter Überdüngung, weil eine langsame Strömung dem Bodenwasser nur wenig Sauerstoff zuführt. In großen Flussmündungen an der Ostküste der USA (wie der Chesapeake Bay) mangelt es deswegen ständig an Sauerstoff.

Überschüsse von Stickstoff oder Phosphat, die in die Küstengewässer gelangen, sind vor allem auf veränderte Lebensgewohnheiten von Menschen zurückzufüh-

## In Kürze

- Wo **Pflanzennährstoffe** über Flüsse ins Meer gelangen, vernichten sie in flachen Küstenzonen der ganzen Erde alles Leben. Es entstehen so genannte **Todeszonen**.
- Dünger führt zur Vermehrung von mikroskopisch kleinen, nahe der Wasseroberfläche schwimmenden Pflanzen. Das blockiert für die Pflanzen am Meeresboden das Sonnenlicht, eine große Menge an **totem organischem Material** sammelt sich am Meeresboden. Bakterien, die dieses Material zersetzen, verbrauchen den in Bodennähe vorhandenen Sauerstoff, und alle tierischen Organismen sterben ab.
- **Marine Ökosysteme** lassen sich renaturieren – jedoch nur, wenn die Nährstoffe aus Land- und Abfallwirtschaft drastisch reduziert werden und die Überfischung dieser Zonen beendet wird.

**Todeszonen auf unserem Globus: Sobald Bakterien die Reste explosionsartig vermehrter Algenblüten zersetzen, wird den Gewässern der letzte Sauerstoff entzogen – der Lebensraum stirbt. Dieses Phänomen tritt vor allem in flachen, küstennahen Meeresgebieten auf, etwa im Einzugsbereich von Industrieansiedlungen. Seit 1990 hat sich die Zahl betroffener Gebiete verdoppelt. Obwohl die meisten Todeszonen durch Nährstoffeinträge vom Land entstehen, gibt es für sie manchmal auch natürliche Ursachen. Im Schwarzen Meer hat sich die Todeszone in den letzten Jahren stark zurückgebildet.**

ren, die an Küsten oder in der Nähe von Flussmündungen leben. Erhöhter Verbrauch fossiler Brennstoffe (wodurch Stickstoff in die Atmosphäre gelangt), Abwässer aus Massentierhaltung, Intensivlandwirtschaft sowie auch immer mehr Kläranlagen steigern die Nährstoffbelastung der Flüsse. 2005 publizierte die UN das Millenium Ecosystem Assessment (Millenium-Bewertung von Ökosystemen). Darin heißt es, dass der Stickstoffgehalt im Meer von 1860 bis 1990 um 80 Prozent zugenommen hat; bis Mitte dieses Jahrhunderts sei mit einem weiteren Zuwachs von 65 Prozent zu rechnen. Es liegt also nahe, dass Todeszonen sich eher noch weiter ausbreiten werden, wenn die Menschheit nicht bald die Zufuhr von Pflanzendüngemitteln ins Meer in den Griff bekommt.

Todeszonen entstehen nur als letzter Akt eines Prozesses, der durch Überdüngung ausgelöst wird. Denn das meeresbiologische System wandelt sich schon lange vorher, vor allem bei den Tierpopulationen. Die Nahrungskette eines gesunden, küstennahen Ökosystems beginnt auf der untersten Ebene mit Kieselalgen, dem Teil des Meeresphytoplanktons mit Kieselsäureschalen. Diese werden von Ruderfußkrebsen (Copepoden) gefressen, winzigen zooplanktischen Krebsen, die wiederum Fischen als Nahrung dienen.

Erhöht sich die Nährstoffkonzentration, so verändert das den Mix der Phytoplanktonarten: Kieselalgen verlieren gegenüber anderen, unverdaulicheren Spezies. Wenn nun durch die Eutrophierung mehr Phytoplankton blüht, dann schaffen es die Ruderfußkrebse nicht mehr, die neuen Algenarten abzuweiden. Auch dem Überangebot an organischen Feinpartikeln, die beim Niedergang des Ökosystems entstehen, sind sie dann nicht mehr gewachsen.

Dadurch vermehren sich Organismen, die unter solchen Bedingungen eben besser gedeihen können. Ein Beispiel ist *Noctiluca*, das Meeresleuchttierchen, das beim Wellengang phosphoresziert. Biologen bezeichnen solche quallenartige Fauna auch als Sackgassenart, weil räuberische Spezies, die in der Nahrungskette höher stehen, kaum von ihnen allein leben können. Damit sinkt die Effizienz der Nahrungskette und reduziert die Größe der Fischbestände.

Gerät die Nahrungskette erst einmal aus dem Gleichgewicht, kann kommerzieller Fischfang sie noch weiter beschädigen, vor allem dann, wenn hochwertige und in der Nahrungskette ganz oben stehende Räuber gejagt werden, wie Kabeljau, Seehecht, Doraden oder Bastardmakrelen. Verschwinden diese Räuber, dann vermehren sich die Bestände kleinerer Fische, die wiederum ihre Nahrung, das Zooplankton, deshalb überproportional dezimieren. Das lässt das Phytoplankton noch weiter wuchern. Wissenschaftler bezeichnen diesen Prozess als »trophische Kaskade«. Eine ineffiziente Nahrungskette reichert auf dem Meeresboden organische Stoffe an, was die Entwicklung hin zu einer Todeszone beschleunigt.

Ökosysteme, die durch Überdüngung gestört sind, werden zusätzlich anfälliger für die Invasion gebietsfremder Arten, wie sie etwa mit dem Ballastwasser transozeanischer Schiffe eingeschleppt werden. So wurde Ende der 1980er Jahre die Rippenqualle *Mnemiopsis leidyi* im Schwarzen Meer heimisch, vermutlich von der Ostküste der USA herkommend. Bereits 1990 hatte dieser gefräßige Sackgassenräuber das dortige Ökosystem überwältigt und erreichte mit bis zu fünf Kilogramm pro Quadratmeter eine schier unglaubliche Dichte.

## Austern als Ökosystemingenieure

Manchmal tragen Muschelriffe dazu bei, die Degradierung eines Ökosystems abzuwehren. In vielen Ästuaren der amerikanischen Ostküste wirken Austern als Ökosystemingenieure, indem sie große Riffe bilden, die oft vom Meeresboden mehrere Meter aufragen; diese Riffe beherbergen eine vielfältige Lebensgemeinschaft – mit Plattfischen, Schnappern, Silberbarschen und Blaukrabben.

Hunter Lenihan und Charles H. Peterson von der North Carolina University in Chapel Hill konnten zeigen, dass bei der Entstehung einer Todeszone im dortigen Fluss Neuse die Spitzen von Austernriffen zum Zufluchtsort für am Boden lebende Organismen wurden. Letztere waren offenbar aus den tieferen, ▷

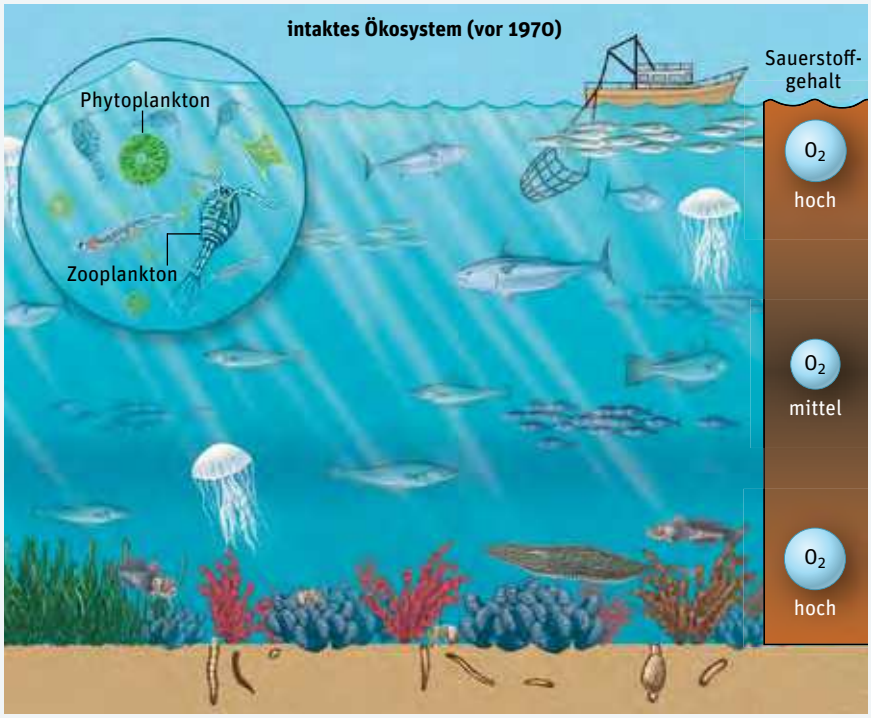
BEIDE FOTOS: TIM STEVENS

**Tot und doch wiederbelebt: links ein Stück Boden des Schwarzen Meers mit Resten von Muscheln, die an Sauerstoffmangel verendeten. Rechts eine Zone, in der sich der Boden allmählich erholt – mit vielfältigem Algenbewuchs und zahlreichen Seescheiden *(Ascidianae)***

## Wie entsteht eine Todeszone?

**Die Todeszone im Schwarzen Meer** zeigt, wie sauerstoffarme (hypoxische) Gewässer veröden können. Zuerst verstärkt sich der Nährstoffeintrag. Diese Überdüngung (Eutrophierung) lässt Algen und andere photosynthetisch aktive Pflanzen wuchern. Sie entziehen dem Wasser den letzten Sauerstoff. In den tieferen Wasserschichten sterben Pflanzen und Tiere ab.

Drei Stadien prägen den Niedergang küstennaher Ökosysteme, wie sie zuerst von Tatsuki Nagai von der Japanischen Fischerei-Forschungs-Agentur beschrieben wurden. Nagai untersuchte eines der sauerstoffarmen Gebiete, das in Japan in den 1960er Jahren in der Seto-Inlandsee entstand. Den ursprünglichen Zustand nannte der Biologe das »Meer der roten Brassen« (nach einem dortigen Raubfisch). Dem folgte das »Meer der Anchovis«, da nach dem Verschwinden der Raubfische nur deren kleinere Beutefische übrig blieben. Im dritten Stadium, dem »Meer der Quallen«, waren die meisten Arten bereits ausgestorben oder ausgewandert; das Meer wurde nun von eingewanderten, sehr toleranten Arten dominiert. Als einer der ersten Forscher hat Nagai auf die Überfischung als eine Ursache für den Niedergang der Nahrungskette im Meer hingewiesen.




**Die Küstengewässer im Nordwestteil** des Schwarzen Meers waren einst reich an Phytoplankton (treibenden Algen und anderen mikroskopisch kleinen Pflanzen) sowie an Fischen und anderen Organismen. In den flachen Zonen tummelten sich aufwachsende Anchovis, Makrelen und Tunfische. In den mittleren Tiefen lebten große Schwärme von Raubfischen, wie etwa dem Wittling, daneben zahlreiche ihrer Beutefische sowie einige Quallen. Am Meeresboden gediehen Miesmuscheln zwischen ausgedehnten Wiesen aus Seegras, braunen und roten Algen. Dazwischen lebten Grundeln, Steinbutte, Störe und Einsiedlerkrebse.

▷ sauerstoffarmen Zonen in die besser mit Sauerstoff versorgten höheren Wasserschichten ausgewichen. Das mechanische Abfischen von Austern kappt häufig die Spitzen dieser Riffe und trägt so dazu bei, die natürliche Widerstandskraft dieses Lebensraums zu schwächen.

Auch im Schwarzen Meer ist das einst intakte Ökosystem durch Nährstoffüberschüsse vernichtet worden. Dieser Fall zeigt aber auch, wie so ein System renaturiert werden kann. Vor allem der nordwestliche Teil des Schwarzen Meers wurde Opfer langjähriger Überdüngung. Im Zeitraum zwischen 1960 und 1980 hatte sich der Eintrag stickstoff- und phosphathaltiger Substanzen vom Land mehr als verdoppelt.

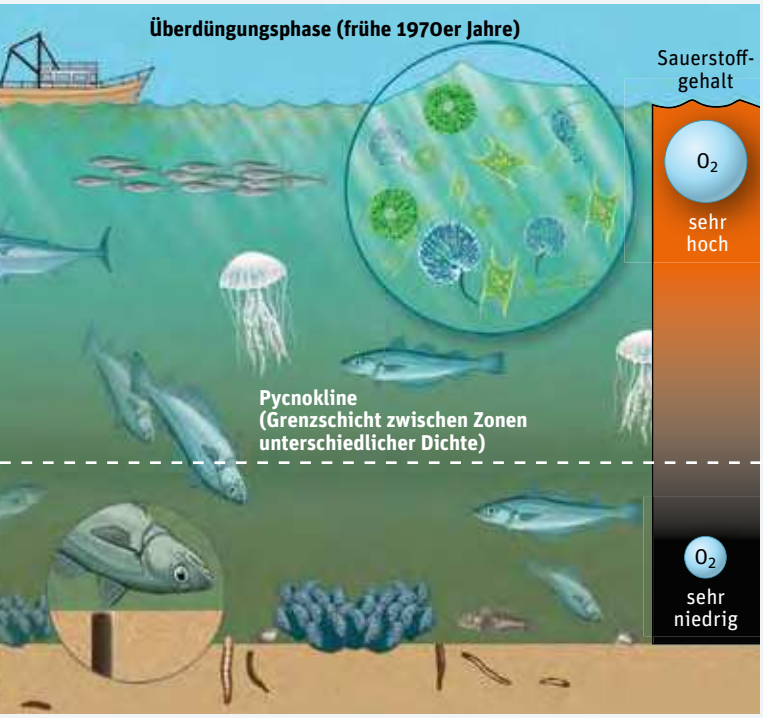
Der hauptsächliche Zufluss entstammte der Donau, die Stromgebiete aus elf Ländern Zentraleuropas entwässert, von Deutschland bis nach Rumänien. Verursacher sind Abwässer aus Landwirtschaft, Städten und Industrie sowie beim Stickstoff der Eintrag aus der Atmosphäre. Mindestens die Hälfte des Stickstoffs, der zusätzlich in das Schwarze Meer einfloss, kam aus der Landwirtschaft, vor allem aus Düngemitteln und Massentierhaltung.

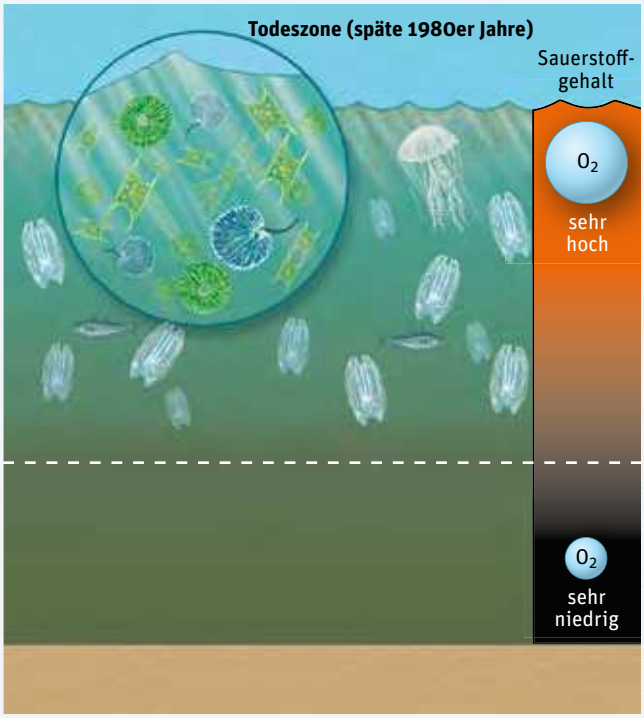
Diese Agraraktivitäten steigerten auch schon den Phosphatanteil. Doch den Hauptanteil zur Eutrophierung hatten industrielle und städtische Abwässer beigetragen, die mit phosphathaltigen Reinigungsmitteln belastet waren.

### Als das Schwarze Meer kippte

Bis in die 1960er Jahre bildete die flache Nordwestregion des Schwarzen Meers ein vielfältiges und produktives Ökosystem. Da gab es großflächige küstennahe Matten von am Boden lebenden Braunalgen sowie, etwas fernab der Küste, mit der größten Rotalgenkolonie der Welt, ein *Phyllophora*-Feld von der Größe der Niederlande. Diese natürlichen Algenwiesen existierten zusammen mit riesigen Bänken von Miesmuscheln und anderen Muschelarten, ein Lebensraum für zahllose wirbellose Tiere und Fische. Algen versorgten die bodennahen Wasserschichten mit Sauerstoff, Muscheln filtrierten das Wasser, hielten es klar und sorgten so für gute Lichtbedingungen für die Photosynthese. Dieses Ökosystem konnte eine Reihe klimatischer Schwankungen und anderer natürlicher Störungen gut verkraften. Mit steigender Nährstoffzufuhr tauchten jedoch im Oberflächenwasser verstärkt Phytoplanktonblüten auf. Diese trübten die Gewässer, immer weniger Licht erreichte die am Boden lebenden Algen, bis diese verschwanden. So kippte das gesamte natürliche Ökosystem des Schwarzen Meers.

Während der Sommermonate, in denen sich unterschiedliche Wasserschichten ausbilden, sank der Sauerstoffgehalt, besonders in Bodennähe. Viele der dort siedelnden Muschelgemeinschaften konnten




ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE: SHAWN GOULD

**Mit zunehmendem Nährstoffeintrag** von Stickstoff und Phosphat veränderte sich die Ökologie des Schwarzen Meers. Phytoplankton-Blüten färbten das Wasser grün oder braun und beschatteten die am Meeresboden lebenden Pflanzen. Mehr als je zuvor rieselte laufend verwesendes Material zu Boden. Bakterien zersetzten am Meeresboden die organischen Stoffe und verbrauchten damit den restlichen Sauerstoff, was viele der dort lebenden Organismen absterben ließ.

**Je mehr die Küstengewässer überdüngt wurden**, desto rascher verendete am Meeresboden alles Leben. Intensivfischerei hatte bereits viele der Raubfischarten dezimiert, sodass diese und die anderen größeren Tiere aus dem Gebiet verschwanden. Stattdessen konnten sich jetzt ungehemmt opportunistische, gebietsfremde Arten in der oberflächennahen Wasserschicht vermehren, vor allem die Rippenqualle *Mnemiopsis leydyi*.

trotz dieser Sauerstoffarmut bis zu 20 Tage lang durchhalten, indem sie ihre Schalen schlossen und körpereigene Glykogenreserven aufzehrten, ihre wichtigste Speichersubstanz. Danach jedoch starben die Muscheln en masse und wurden von Bakterien und anderen Organismen zersetzt. Dabei verbrauchten diese den letzten verbliebenen Sauerstoff und lieferten dadurch den Algen noch weitere Nährstoffe. Bis dann der Sauerstoff fast vollständig aus dem System beseitigt war, hatten sich alle dort lebenden tierischen Organismen bereits in andere Gegenden verzogen oder waren ausgestorben. Damit war das natürliche Ökosystem dieser Region nachhaltig geschädigt.

Erst nachdem 1989 die kommunistischen Regierungen Osteuropas kollabiert waren, endete auch die zentralistische Planwirtschaft. Plötzlich hatten die Landwirte kein Geld mehr, um Dünger zu kaufen – die landwirtschaftliche Aktivität ging zurück. Zugleich wurden viele Betriebe mit Massentierhaltung geschlossen, was den Ausstoß von Nährstoffen entscheidend reduzierte. Davor hatte ein einziger Mastbetrieb in Rumänien mit mehr als einer Million Schweinen etwa so viel Schadstoffe eingespült wie eine ganze Stadt mit fünf Millionen Einwohnern.

## Langsame Renaturierung

Der reduzierte Zufluss an Nährstoffen ließ innerhalb von sechs Jahren auch die Todeszone schrumpfen (siehe Kasten S. 56). Der Meeresboden erholte sich jedoch nur schrittweise. So konnten meine Kollegen und ich verfolgen, wie sich die Miesmuschelbänke in den verwüsteten Gebieten des nordwestlichen Flachmeers erst 2002 wieder deutlich erholten, Jahre nachdem dort längst andere Lebensgemeinschaften wieder intakt waren. Eine Forschungsexpedition im August 2005 zeigte uns, dass auch Lebensgemeinschaften der zu den Kieselalgen gehörenden benthischen Algen weit gehend wiederhergestellt waren, obwohl es sich nicht um die gleichen Arten handelte, die vor der Entstehung der Todeszone hier lebten.

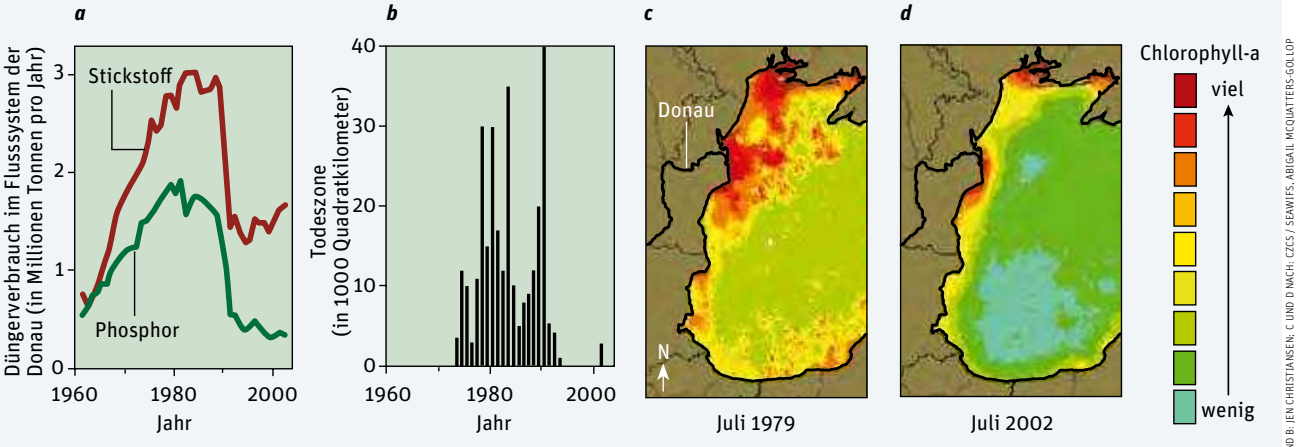
Für eine erfolgreiche Renaturierung von Todeszonen muss also auf jeden Fall die Nährstoffzufuhr aus dem umgebenden Land gesenkt werden. Doch marine Ökosysteme kehren, sind sie einmal durch Überdüngung und Hypoxie kollabiert, dann keineswegs immer zu ihrem ursprünglichen Zustand zurück. Drei Gründe erschweren die Renaturierung:

▶ Flusssysteme besitzen normalerweise eine gewaltige Kapazität, Nährstoffe zu speichern – entweder in gelöster Form im Grundwasser oder an Bodenpartikel angelagert. Jahre oder sogar Jahrzehnte können vergehen, bevor die aus Düngern stammenden Phosphate und Stickstoff ausgewaschen sind und in das Meer gelangen. Besonders stickstoffhaltige Substanzen sammeln sich eher im Grundwasser an. ▷

## Wie das Schwarze Meer gerettet wurde

**Will man betroffene Meereszonen** wieder in einen ökologisch intakten Zustand zurückführen, gilt es vor allem, den Nährstoffeintrag aus der Landwirtschaft und anderen Quellen drastisch zu verringern. Die Todeszone im Nordwesten des Schwarzen Meers konnte sich erst nach dem Zusammenbruch der kommunistischen Regierungen 1989 wieder erholen. Denn erst danach wurden Massentierhaltung und der starke Einsatz von stickstoff- und phosphatreichem Dünger beendet (a). Nährstoffe aus Landwirtschaft und Abwässern gelangten über die Donau ins Schwarze Meer, deren Nordwestteil sie erstmals 1973 in eine Todeszone verwandelte, die 21 Jahre lang periodisch jeden Sommer zurückkehrte (b). Die rote Farbe in dem Satellitenfoto von 1979 (c) zeigt, wie weit sich die überdüngten Gewässer verbreitet hatten. (Die Eutrophiebereiche in Bildern (c) und (d) wurden durch Chlorophyll-a gemessen, als Indikator für das Pflanzenwachstum im Oberflächenwasser.)

**Fünf Jahre nach Beendigung der Intensivlandwirtschaft** erwachte die Todeszone wieder zum Leben (b, d), mit einem einzigen kleinen Einbruch im außergewöhnlich heißen Sommer von 2001. Die Miesmuschelgemeinschaften hatten sich erst 1998 erholt. Diese Zone kann allerdings auch schnell wieder umkippen, da inzwischen die Wirtschaft der Anrainerstaaten erneut wächst und die Landwirtschaft inzwischen wieder intensiviert wird.




A UND B: JEN CHRISTIANSEN; C UND D NACH: CZCS / SEAWIFS, ABIGAIL MCQUATTERS-GOLLOP

▷ ▶ Die Renaturierung von Todeszonen verzögert sich, wenn in der näheren Umgebung kaum intakte Lebensgemeinschaften von Pflanzen und Tieren vorkommen, die als Keimzellen für eine Wiederbesiedlung dienen können. Denn die ursprünglich im Gebiet vorkommende Flora und Fauna kann inzwischen ausgestorben sein. Viele Meerestiere werden als Larven über lange Distanzen fortgetrieben und besiedeln woanders geeignete biologische Nischen. Manchmal werden diese potenziellen Heimkehrer von opportunistischen Einwanderern verdrängt, die inzwischen alle verfügbaren Nischen besetzt haben.

▶ Schließlich ändert Überdüngung die Ökosysteme auf eine Weise, die sich nicht immer einfach umkehren lässt (siehe Grafik S. 57). Steigt der Nährstoffgehalt, werden einige Arten seltener, aber das Ökosystem als Ganzes bleibt bestehen, wenn seine natürlichen Populationen das starke Wachstum des Phytoplanktons verkraften können.

Ab einem bestimmten Zeitpunkt wird aber eine Schwelle überschritten, bei welcher der Rückgang bestimmter Schlüsselarten das ganze System kollabieren lassen kann. Ein neues Gleichgewicht stellt sich dann ein zwischen einigen der verbliebenen Arten, welche die Überdüngung tolerieren, und neu angekommenen, opportunistischen Invasoren. Leider ist dieser neue, degradierte Zustand des Ökosystems oft selbst ziemlich stabil, weshalb auch eine Abnahme der Überdüngung das Ökosystem nicht unbedingt wiederherstellt. Dazu muss die Nährstoffzufuhr möglicherweise noch deutlich unter das Ausgangsniveau abgesenkt werden.

### Unerreichbarer Ausgangszustand

Ein weiterer Umstand verkompliziert die Dynamik von Ökosystemen: Hat die natürliche Widerstandsfähigkeit eines Ökosystems bereits durch Überfischung gelitten, kippt es noch rascher vom natürlichen zu einem degradierten Zustand. Deswegen kann es zusätzlich geboten sein, den Fischfang einzuschränken, um die Rückkehr zu einem gesunden System zu eröffnen.

Sind die in dem ursprünglichen System lebenden Arten komplett verschwunden oder fremde Arten eingewandert, kann es sein, dass der ursprüngliche Zustand nicht mehr erreicht wird. Es reicht nicht zu wissen, wie man Todeszonen repariert; auch die Regierungen der beteiligten Länder müssen überzeugt sein, dass dies ein wichtiges Ziel ist. Tatsächlich konnten Wissenschaftler bisher wenige Fälle der Erholung von Todeszonen dokumentieren. Denn der Nährstoffeintrag lässt sich nur senken, wenn sich auch die landwirtschaftlichen Methoden ändern und die Abwässer besser geklärt werden. Die meisten bisherigen Programme ereichten allenfalls eine halbherzige Senkung des Nährstoffeintrags.

Um den Zufluss von Nährstoffen wirklich zu verringern, müssen also umfassende Pläne für gesamte Flusssysteme realisiert werden, sodass Stickstoff und Phosphat an Land verbleiben und nicht mehr in die Gewässer gelangen. Derartige Anstrengungen gibt es zurzeit in der Chesapeake Bay an der amerikanischen Ostküste und im Schwarzen Meer. Im letzten Fall haben sich die Anrainerstaaten unter der Führung der Globalen Umweltabteilung der UN auf eine Initiative verständigt, nach der die Nährstoff-

einträge wieder auf das Niveau von 1995 abgesenkt werden sollen. Offenbar wird dieses Vorhaben mit Pilotprojekten unterstützt, die auch die Land- und Abfallwirtschaft verbessern sollen. Zwei wichtige Faktoren müssen jedoch überwunden werden, bevor eine komplette und langfristige Wiederbelebung des Schwarzmeer-Ökosystems gelingen kann.

## Fatales Fischen mit Grundnetzen

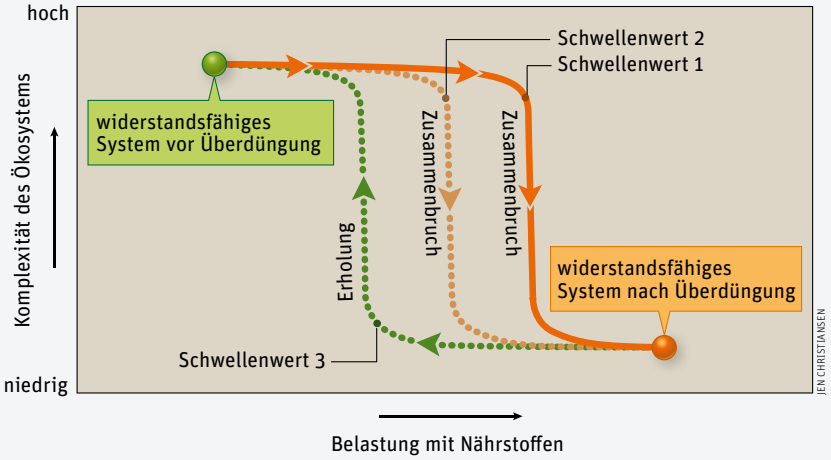
Erstens: Die Regierungen Europas sollten Maßnahmen ergreifen, durch die neues Wirtschaftswachstum nicht wieder die Nährstoffeinträge ins Meer erhöht. Dazu müssten viele Projekte zur Abfallentsorgung auf den neuesten Stand der Technik gebracht werden. Dies wäre besonders wichtig für das Donaudelta, aus dessen Bereich vor Kurzem sechs Länder der EU beigetreten sind. Einige Landwirte aus Westeuropa, wo die Landwirtschaft schon oft Flüsse und Küstengewässer überdüngt hat, stehen bereits in den Startlöchern, um auch in Mitteleuropa landwirtschaftliche Flächen zu erwerben.

Zweitens: Künftige Regierungen müssen die Intensität der kommerziellen Fischerei so weit zurückfahren, dass sich auch die überfischten Bestände der Raubfische wieder erholen können. Zusätzlich zerstört die Lebensgemeinschaften am Meeresboden das Fischen mit Grund- und Schleppnetzen, so genannten Dredgen – Netzsäcken oder Metallkörben, die zur Muschelernte an der Unterseite mit gezahnten Stahlkanten versehen werden. Tatsächlich sollten Küstenländer weltweit darauf hinarbeiten, den Druck der Fischerei auf überdüngte Gebiete zu verringern – kein leichtes Ziel, da schon heute über die Hälfte aller Fischbestände überfischt ist. Ein internationales Abkommen will bis 2012 ein globales Netzwerk von Schutzzonen im Meer errichten. Damit sollen die weltweite Überfischung eingedämmt und die Tierpopulationen erhalten werden, die für eine Wiederbesiedlung von Todeszonen nötig sind.

Auch wenn ein eutrophiertes Ökosystem sich teilweise erholt hat, sollten sich die zuständigen Institutionen bewusst sein, dass halbherzige Schritte die Lage sogar destabilisieren können. Miesmuscheln etwa sind außerordentlich effektive Wasserfiltrierer, weswegen Miesmuschelbänke oft auf künstlichen Riffen angesiedelt wurden, um dort die Wasserqualität zu verbessern. Doch sobald Bakterien die abgestorbenen Muscheln und deren Fäkalien zersetzen, wird so viel Sauerstoff verbraucht, dass in schlechter durchmischten Wasserzonen in rascher Folge ganze Populationen heranwachsen und wieder kollabieren. Bricht eine Muschelpopulation plötzlich zusammen, breitet sich so lange eine neue Todeszone aus, bis alles organische Material abgebaut ist und sich das System aufs Neue erholen kann. In den Flussmündungen am Schwarzen Meer wurde dieses Phänomen öfter beobachtet. Es ist eine Herausforderung für alle Manager mariner Ressourcen, die Umweltbedingungen so stabil zu halten, dass widerstandsfähige und artenreiche Systeme erhalten werden – auch wenn eine vollständige Erholung nicht immer möglich sein wird.

Küstennahe Todeszonen erinnern uns daran, dass wir Menschen von natürlichen Ökosystemen nicht erwarten sollten, dass sie unseren Müll ohne schwere und oft unerwartete Folgen absorbieren können. Heute wissen wir, wie Todeszonen renaturiert werden können. Aber letztendlich müssen wir dafür den Wert erkennen, den wir den marinen Ökosystemen unserer Welt beimessen. ◁

## Kollaps und Wiederbelebung




**Für die Renaturierung einer Todeszone** reicht es nicht unbedingt, die Nährstoffbelastung auf das Niveau vor der Katastrophe zu senken. Die Grafik zeigt die Güte eines Ökosystems (gemessen an seiner Komplexität oder Artenvielfalt) in Abhängigkeit ihres Nährstoffgehalts. Hochkomplexe Systeme mit geringen Nährstoffeinträgen sind in der Regel sehr widerstandsfähig, bis die Belastung einen bestimmten Wert überschreitet (Schwellenwert 1). Dann kollabiert das System und sinkt auf einen Zustand geringerer Komplexität. Diese Schwelle wird rascher erreicht, wenn zusätzlich die Tierbestände durch Überfischung dezimiert wurden (Schwellenwert 2). Leider ist der neue, minderwertigere Zustand sehr stabil. Eine Renaturierung setzt dann erst ein, wenn der Nährstoffeintrag deutlich unter das Ausgangsniveau fällt (Schwellenwert 3) – das ist die Hysterese der Renaturierung. Selbst dann erreicht das Ökosystem nicht notwendigerweise seinen Ausgangszustand, wenn inzwischen Schlüsselarten des Systems ausgestorben sind.

**Laurence Mee** ist Direktor des Meeresbiologischen Instituts an der Universität von Plymouth in England sowie des interdisziplinären Forschungszentrums für Politik des Meers und der Küsten. Er promovierte an der Universität von Liverpool in Ozeanografie und war am Institut für Wissenschaft des Meers und des Süßwassers in Mexiko, am IAEA Meeres-Umwelt-Laboratorium in Monaco. Mee koordinierte das UN-Programm zur Ökologie des Schwarzen Meers.



Restoring the Black Sea in times of uncertainty. Von L. D. Mee et al. in: Ozeanography, Bd. 18, S. 32, 2005

Ecosystems and human well-being: current state and trends. Millenium Ecosystem Assessment. Island Press, 2005 (www.millenniumassessment.org/en/Condition.aspx)

Nutrient-enhanced productivity in the northern gulf of Mexico. Von N. N. Rabelais et al. in: Hydrobiologia, Bd. 475, Nr. 6, S. 39, 2002


Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/866415

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

# Das heimliche Wirken der Pseudogene

Zu Tausenden erzählen verunstaltete Genrelikte von der Vergangenheit. Aber anscheinend sind nicht alle nur nutzlose Fossilien. Manche wachen offenbar über ihre Zwillingsgene.

Von Mark Gerstein und Deyou Zheng

Unser Genom enthält eine Menge Leichen – verstümmelte Reste längst verblichener Gene. Chromosomen sind damit reich bestückt. Ähnlich wie Knochenfossilien erzählen diese so genannten Pseudogene manches über unsere Evolutionsgeschichte. Bisher hielten Forscher solche Überbleibsel für funktionslos. In letzter Zeit finden sie jedoch immer mehr Indizien dafür, dass sich zumindest einige dieser Genfossilien noch regen, dass in ihnen gewissermaßen noch Leben steckt. Dies zeigt wieder einmal, wie wenig wir bisher das menschliche Genom verstehen.

Dass unser Erbgut weniger einer Datenbank ähnelt als einem dynamischen Verarbeitungssystem, ist Fachleuten schon länger bewusst. In Analogie zum Computer würden Pseudogene auf der Festplatte noch vorhandene Programmreste darstellen, die zwar heute nicht mehr zu brauchen sind, aber noch widerspiegeln, wie die Kodes einst entstanden und sich seitdem weiterentwickelten. Von den Genresten können wir lernen, wie Genome sich in der Evolution umgestalten, an neue Bedingungen anpassen – und vielleicht sogar erfahren, wie sie manchmal bereits ausgemusterte Elemente wieder beschäftigen.

»Falsche« Gene, die zwar richtigen Genen glichen, offenbar aber keine Funktion erfüllten, entdeckten Genetiker erstmals in den späten 1970er Jahren. Damals begannen Forscher damit, auf den Chromosomen wichtige Erbfaktoren zu lokalisieren. So suchten sie beispielsweise nach dem Gen für Beta-Globin, einer Komponente des Sauerstofftransporters Hämoglobin. Sie fanden tatsächlich eine DNA-Sequenz, die das gesuchte Gen darzustellen schien.

Bei genauerem Hinsehen konnte das aber nicht stimmen. Denn mit diesem »Gen« hätte die Zellmaschinerie, die Erbsequenzen in Proteine übersetzt, gar nichts Rechtes anfangen können. Entscheidende Zutaten, die ein Gen braucht, waren defekt, durch Mutationen zerstört. Erst seit Forscher ganze Genome, auch das des Menschen, sequenziert haben, gewinnen sie einen besseren Überblick über die Landschaft solcher Erbsätze. Staunend erkennen sie, wie viele Ungereimtheiten die verschiedenen Genome aufweisen.

Das menschliche Genom enthält über drei Milliarden Nukleotide – die Bausteine der DNA. Lediglich zwei Prozent davon »kodieren« direkt für Proteine; das heißt, sie verschlüsseln die Abfolge der Aminosäuren, aus denen Proteine bestehen. Etwa ein Drittel der Gesamt-DNA dürften nichtkodierende Sequenzen innerhalb von Genen darstellen, so genannte Introns, die nach dem Ablesen der Gene herausgeschnitten werden. Der große Rest des Genoms, lange Strecken zwischen den funktionalen Genen, liegt für die Forscher zu weiten Teilen buchstäblich noch im Dunkeln. Die meisten Pseudogene finden sich inmitten dieser »dunklen genetischen Materie«, wie rostige Autowracks, die irgendwo zurückgelassen wurden. Allerdings erstaunt deren Anzahl. Bislang haben unsere und andere Forschergruppen im menschlichen Genom über 19 000 Pseudogene identifiziert, vermutlich werden es noch mehr. Nach neuerer Schätzung besitzt der Mensch wohl nur etwa 21 000 Gene, die für Proteine kodieren. Womöglich liegt die Anzahl der Pseudogene also höher. Schon ihre schiere Zahl macht stutzig. Woher stammen diese Scheingene? Wie könnten sie entstanden sein? Und warum gibt es so viele von ihnen? Weshalb werden sie in der Evolution mitgeschleppt, wenn sie doch offenbar nur nutzlosen Ballast bilden?

## Jedem eine eigene Vergangenheit

Einige dieser Aspekte können sich die Wissenschaftler schon recht gut erklären. Sie vermuten, dass ein kleiner Teil früher ordentliche Gene waren, die wegen schädlicher Mutationen in ihrer Nukleotidsequenz sozusagen abstarben. Doch die Mehrzahl scheint eine andere Vergangenheit zu haben. Sie sind nämlich funktionsunfähige Zwillinge brauchbarer Gene. Manche waren von vornherein schadhaft, andere wurden es später.

Ein funktionstüchtiges Gen benötigt einen bestimmten Aufbau (siehe Kasten S. 60/61, rechts). Dazu gehören Exons: Abschnitte, deren Bausteinsequenz für eine Kette von Aminosäuren im späteren Protein kodiert. Typischerweise enthalten Gene auch Introns: Zwischenstücke zwischen den Exons, die zur Herstellung des Proteins nicht benötigt werden. Den Anfang eines Gens bildet der Promotor, ein Segment, das der Zellmaschinerie am

DAVE CUTLER STUDIO

**Unser Genom ist mit Genresten gespickt (hier als umgekippte und kaputte Lampen dargestellt), die teilweise aus uralter Zeit stammen. Doch handelt es sich nicht nur um Ballast. Einige Pseudogene melden sich noch zu Wort – und sind sogar unverzichtbar.**

Chromosom als Erkennungsstelle und Startpunkt für das Gen dient.

Die Expression eines Gens zur Proteinherstellung beginnt damit, dass sich bestimmte Moleküle an den Promotor setzen und dann das Gen entlangwandern. Sie fertigen vom Gen eine Abschrift an – die vorläufige, unreife RNA-Kopie. Auf diese Transkription erfolgt das Splicing: Aus der RNA-Kopie werden die Introns herausgetrennt und die Exons aneinandergefügt. Diese und weitere Schritte, durch die eine reife RNA-Vorlage für Proteine entsteht, heißen Prozessierung. Erst an dieser »Matrize« bildet die Zelle jene Kette von Aminosäuren, aus denen das Protein besteht, das die Genfunktion erfüllt.

Wie erwähnt entstanden fast alle Pseudogene anscheinend aus der – mehr oder weniger vollständigen – Verdopplung eines schon vorhandenen Gens. Das konnte offenbar auf zwei völlig verschiedenen Wegen geschehen – was man dem Zwilling deutlich ansieht (siehe Kasten S. 60/61).

Erstens: Vor einer Zellteilung verdoppelt (dupliziert oder repliziert) die Zelle ihr gesamtes Genom. Dabei kann es vorkommen, dass von einem Gen eine Kopie zu viel entsteht, die woanders ins Erbgut eingebaut wird.

Zweitens: Eine RNA-Matrize (die Vorlage für Proteine) wird in DNA zurückübertragen und an einer neuen Stelle ins Genom eingebaut. Der Vorgang heißt reverse (umgekehrte) Transkription. Häufig dürfte das eine Form der so genannten Retrotransposition (sozusa- ▷

gen Rückführung) bewerkstelligen, bei der sich lange Sequenzwiederholungen der DNA selbst kopieren. Diese Wiederholungseinheiten, von denen unser Erbgut Unmengen enthält, werden Lines genannt *(long interspersed nuclear elements)*. Lines verhalten sich ähnlich wie ins Genom integrierte Retroviren, das heißt sie können sich mittels Retrotransposition vervielfältigen und die Kopien integrieren. Das geschieht nicht sehr sauber: Leicht nehmen sie dabei andere RNA von gerade aktiven Genen mit.

Beide Prozesse, die Duplikation von Genen und die Retrotransposition, gehören zu den wichtigsten Mechanismen, die das Genom in der Evolution umformen. Dadurch können Genome wachsen und ihre Funktionen erweitern, denn viele der hinzugekommenen Gene bleiben aktiv, können weiter mutieren und andere Aufgaben wahrnehmen. So entstehen neue Organismenvarianten. Auch Pseudogene kommen auf solche Weise zu Stande – etwa wenn die Genkopie durch Schreibfehler schadhaft ist, oder wenn ihr wichtige Abschnitte fehlen, wie zum Beispiel der Promotor.

Pseudogene, die bei der Verdopplung kompletter Gene entstanden, enthalten Introns und Exons – daran sind sie erkennbar. Sie heißen »duplizierte Pseudogene«. Den anderen, die ihr Dasein einer Rückführung aus RNA verdanken, fehlen die Introns – das RNA-Transkript war ja bereits zurechtgeschnitten. Die Forscher sprechen bei ihnen folglich von »prozessierten Pseudogenen«.

Bemerkenswert ist, dass sich die Scheingene zwar recht beliebig über das gesamte Genom verteilen, dass sie aber vorwiegend von bestimmten Gensorten abstammen. Funktionsfähige Gene ordnen die Forscher nach der Ähnlichkeit ihrer Sequenzen und Funktionen Familien zu. Offenbar hat nur ein Viertel der Genfamilien Pseudogene hervorgebracht, manche davon sogar eine beträchtliche Anzahl. Da sind zum Beispiel die rund 80 Gene für die Proteine von Ribosomen, jener Partikel der Zellmaschinerie, an denen die Proteinsynthese abläuft. Zu ihnen existieren ungefähr 2000 prozessierte Pseudogene – ein Zehntel der bisher beim Menschen bekannten Menge. Allein vom ribosomalen Gen *RPL21* gibt es über 140 Gegenstücke (siehe Kasten S. 62). Vermutlich hängen diese großen Unterschiede mit den Aktivitätsniveaus der einzelnen Gene zusammen. Solche, die viel gefragt sind, bieten eben mehr Gelegenheit für Retrokopien.

Die beschriebenen Mechanismen scheinen alt zu sein. Manche Pseudogene stammen von inzwischen überflüssigen Erbsequenzen, zu denen es längst keine funktionstüchtigen Versionen mehr gibt. In anderen Fällen haben sich die korrespondierenden funktionalen Gene mit der Zeit stark verändert. Dann kann ein Pseudogen einen früheren Zustand spiegeln. Die weiten scheinbar nutzlosen Strecken in unserem Genom stecken somit voller Zeugnisse der evolutionären Vergangenheit, sie sind sozusagen Fossillager alter Gene, schweigende Zeugen unserer Evolutionsgeschichte.

Offenbar gelten die Regeln der natürlichen Selektion auch für die Gene. Bei funktionalen Erbsequenzen sind Mutationen meist recht klare Grenzen gesetzt. Wenn sich die Veränderung für den Organismus und dessen Fitness günstig auswirkt, wird ein mutiertes Gen vielleicht

## Herkunft der Scheingene

**Pseudogene entstanden meist auf zwei Wegen (Bilder rechts): infolge von Kopierfehlern beim Verdoppeln (Duplizieren) der DNA – oder infolge einer Rücktranskription von einer RNA-Matrize, an der eigentlich Proteine gebildet werden, in DNA.**

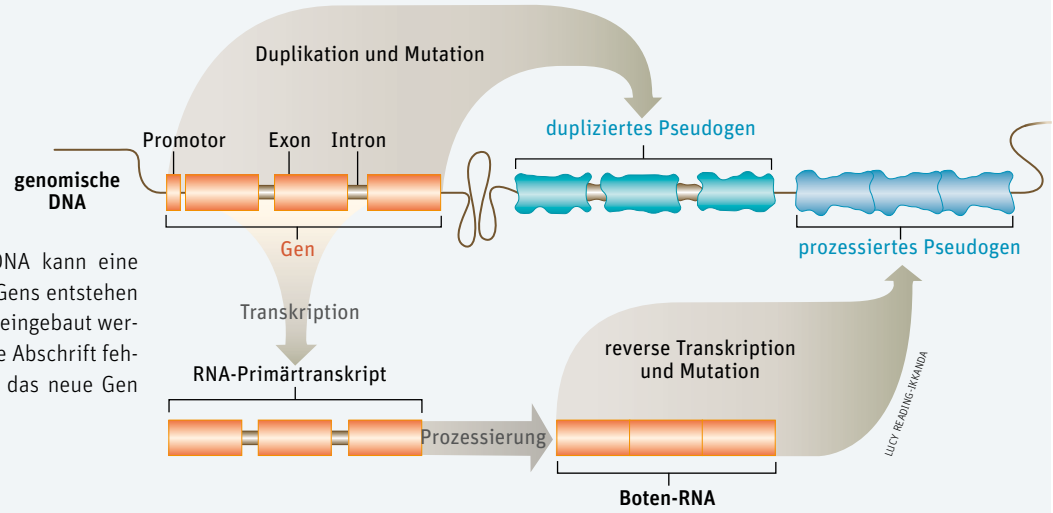
### Tödliche Mutationen an Genen

Viele Arten von Mutationen können ein Gen funktionsunfähig und damit zum Pseudogen machen. Es kann zum Beispiel einen wesentlichen Teil verlieren, etwa den Promotor. Auch der Verlust einzelner Bausteine (Nukleotide) oder ein zusätzlich eingefügter Baustein wirken fatal, weil sie das Leseraster für Aminosäuren verschieben. (Jeweils drei Nukleotide kodieren für eine Aminosäure des Proteins; siehe Bild unten.) Des Weiteren verändern manche – nicht alle – Austauschereignisse eines einzelnen Bausteins den Kode. »Synonyme« – »stumme« – Mutationen machen nichts aus, »nichtsynonyme« ergeben eine andere Aminosäure.

Im unten gezeigten Beispiel ist ein Ausschnitt der Sequenz des menschlichen Gens *RPL21* dargestellt und im Vergleich dazu der gleiche Abschnitt eines seiner vielen Pseudogene, ψRPL21 (siehe auch Kasten S. 62). Man erkennt verschiedene typische Mutationen, die das Gen beschädigt haben. (Die roten und blauen Buchstaben bezeichnen die vier Nukleotide, abgekürzt A, C, G, T; die schwarzen Buchstaben stehen für Aminosäuren.)

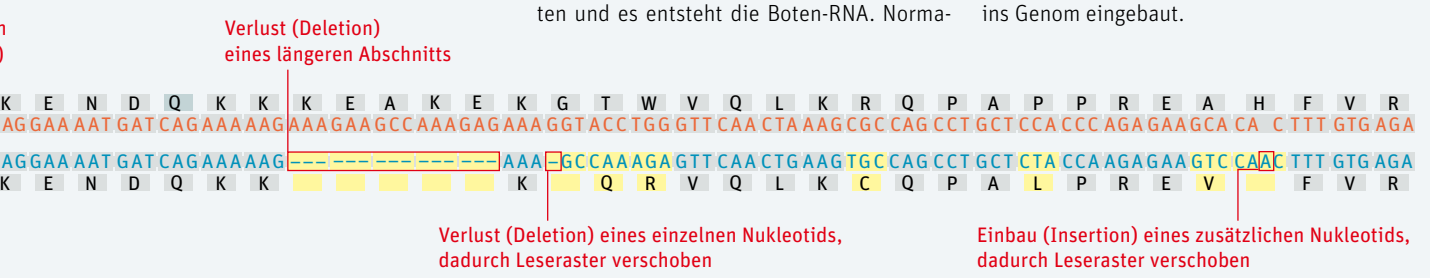
## In Kürze

- **Pseudogene** stellen scheinbar unbrauchbare **Überbleibsel und Kopien von Genen** dar. Zur großen Mehrzahl von ihnen existieren noch die mit ihnen verwandten funktionierenden Gene. Als Genfossilien geben die Pseudogene Aufschluss über die Genentwicklung und Umstrukturierung von Genomen in der **Evolutionsgeschichte**.
- Vermutlich sind einige Pseudogene keineswegs tot. Vielmehr scheinen ihnen neue Aufgaben bei der **Genregulation** zugefallen zu sein.




**Duplizierte Pseudogene**
Beim Vervielfältigen der DNA kann eine überschüssige Kopie eines Gens entstehen und an einer anderen Stelle eingebaut werden. Manchmal ist gleich die Abschrift fehlerhaft. Manchmal lädieren das neue Gen erst spätere Mutationen.

**Prozessierte Pseudogene**
Die DNA-Sequenz eines aktiven Gens wird in RNA umgeschrieben (transkribiert). Diese Sequenz wird dann prozessiert: Überflüssige Teile wie die Introns werden herausgeschnitten und es entsteht die Boten-RNA. Normalerweise ist das die fertige Matrize für das Protein. Manchmal wird diese RNA-Sequenz wieder in DNA zurückgeschrieben – eine reverse Transkription – und das Transkript ins Genom eingebaut.




bewahrt, andernfalls, wenn die Mutation schadet, wird es meist schnell verworfen.

Auf Pseudogenen lastet kein solcher Selektionsdruck. Sie können fast beliebig Mutationen anhäufen, die einem funktionalen Gen niemals erlaubt wären. Die Sequenzveränderungen ihrer Bausteine eignen sich deswegen quasi als molekulare Uhr der Prozesse bei der Evolution des Genoms. So wie Paläontologen aus dem Fossilbericht die Entstehung und den Untergang von Arten rekonstruieren, können Genetiker am DNA-Schrott Geburt und Tod von Genen ablesen.

Unsere Arbeitsgruppe hat Pseudogene bei ganz unterschiedlichen Organismen untersucht, so bei Bakterien, Hefe, Würmern, Fliegen und Mäusen. Scheingene sind weit verbreitet, Regeln für ihre Häufigkeit sind aber schwer auszumachen. Es scheint weder eine strenge Beziehung zur Zahl der Gene eines Organismus zu geben noch zur Genomgröße.

Ein gutes Beispiel bieten die Erbanlagen für die Riechmoleküle (Geruchsrezeptoren) bei den Säugetieren, Proteine in der Riechschleimhaut. Es handelt sich um eine Familie von über tausend Genen – eine der größten Genfamilien dieser Tierklasse. Doron Lancet und Yohav Gilad vom Weizmann-Forschungsinstitut in Rehovot (Israel) haben gezählt, wie viele dieser Gene beim Menschen vorkommen – und wie viele zugehörige Pseudogene er besitzt. Sie erkannten, dass bei uns weniger als die Hälfte jener Gene noch arbeiten, nicht einmal 500. Die israelischen Forscher fanden zudem 300 Sequenzen, die beim Menschen nur noch Pseudogene darstellen, die aber bei Ratten und Mäusen funktionale Gene für Riechmoleküle sind.

Verwunderlich ist das eigentlich nicht. Die meisten anderen Säuger benutzen den Geruchssinn viel intensiver als wir. Erstaunlicher ist, dass unser Genom noch deutlich mehr dieser Pseudogene enthält als das von Schimpansen. Offenbar verloren demnach etliche jener Erbsequenzen ihre Funktion erst, nachdem sich die Vorfahren von Schimpansen und Menschen in verschiedene Linien aufgespaltet hatten. Andererseits tragen auch die Menschenaffen von 30 bis 40 Prozent der Geruchsrezeptorgene nur noch die Pseudoversion – verglichen mit Nagetieren und Hunden ein klarer Abfall. Es sieht so aus, als ob schon unsere Menschenaffenvorfahren nicht mehr sonderlich geruchsempfindlich sein mussten (siehe Kasten S. 64).

## Gut sehen, schlechter riechen

Als Lancet und seine Kollegen verschiedene systematische Gruppen der Primaten untersuchten, erkannten sie eine aufschlussreiche Verteilung: Die größten Verluste an Genen für Riechmoleküle verzeichneten sie in Primatenlinien, die ein recht gutes Farbunterscheidungsvermögen entwickelt haben – die nämlich drei Farbrezeptortypen besitzen. Ursprünglich haben Primaten nur zwei (siehe auch Spektrum der Wissenschaft, 1/2007, S. 96). ▷

▷ Warum können Pseudogene, die durch Duplikation entstanden, Aufschluss über die Geschichte von Organismen geben? Große Genfamilien wie die für die Riechmoleküle bilden sich in der Evolution oft heraus, wenn sich Organismen in einem Bereich auf die Vielfalt ihrer Umwelt einstellen. In dem Zusammenhang besonders beanspruchte Gene verdoppeln sich dann immer wieder und differenzieren sich auch mit der Zeit. Viele Pseudogene entstehen dabei einfach durch Fehler beim Kopieren. Eine Menge Duplikate sterben aber erst nachträglich, etwa weil sich die Umwelt später wieder verändert hat oder sich Organismen nochmals umgestellt haben. Dann werden die vielen ähnlichen Gene schlicht nicht mehr benötigt und können nun beliebig weiter mutieren. Artunterschiede und Anpassungen sind an den Pseudogenen darum oft besonders deutlich erkennbar. Mit regulären Genen, die ihre Aufgaben erfüllen müssen, gelingt das viel mühsamer.

Frappant ist zum Beispiel der Vergleich von menschlichem und Mausgenom. Von den funktionalen Genen des Menschen existiert für 99 Prozent eine Entsprechung bei den Nagern. Auch finden sich für fast alle Regionen des Genoms dazu passende Abschnitte bei den Mäusen – obwohl die Trennung beider Abstammungslinien 75 Millionen Jahre zurückliegt. Anders die Pseudogene: Trotz der ausgeprägten Gemeinsamkeiten von Genen und Genomstruktur hat von den menschlichen Pseudogenen nur ein kleiner Anteil bei der Maus ein Gegenstück (ein Beispiel im Kasten rechts).

Mehr noch: Manche der für Scheingene prädestinierten Genfamilien unterscheiden sich bei den beiden Arten erheblich. An angehäuften Mutationen lässt sich ablesen, dass viele Pseudogene bei der Maus zu einem anderen Zeitpunkt aufkamen als beim Menschen. Offensichtlich verursachten jeweils andere Umweltbedingungen, dass sie sich anhäuften.

## Zu wenig Mutationen

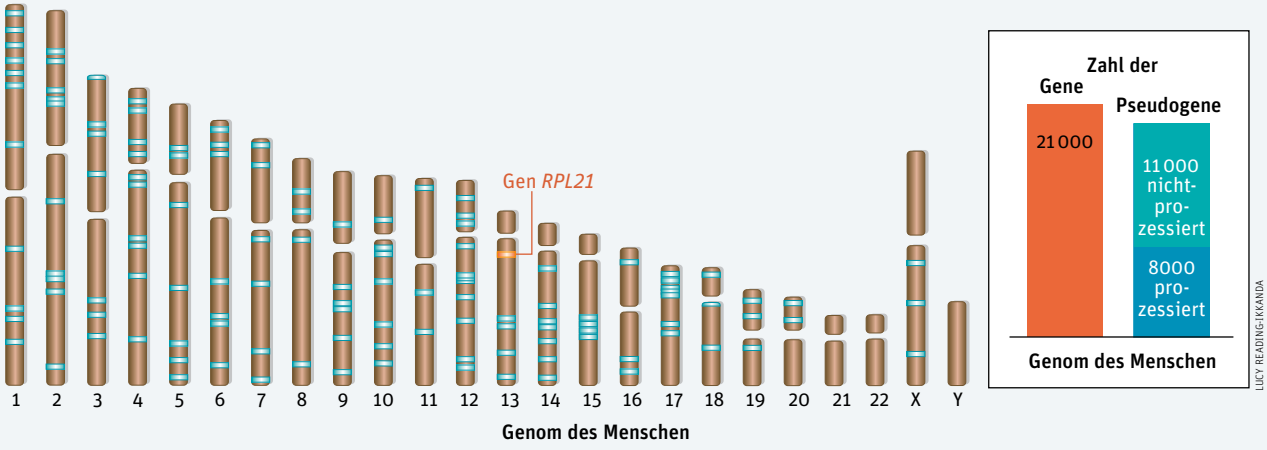
Weil die Pseudogene lange als ziemlich überflüssige Relikte galten, beginnt sich ein eigenes Forschungsfeld für sie erst zu etablieren. Frühere Bemühungen, sie zu erfassen, rührten meist daher, dass Genetiker sie bei der Entschlüsselung des Erbguts nicht mit echten Genen verwechseln wollten. Allerdings lassen sie sich schwerer ausmachen als richtige Gene. Letztere können wir einigermaßen zuverlässig mit Computerprogrammen aufspüren, die nach bestimmten Charakteristika von regulären Genen suchen. Bei Pseudogenen bleibt dagegen nicht viel anderes, als sich daran zu orientieren, dass sie Genen zwar ähneln, aber nicht als solche funktionieren. Man geht so vor, dass man die langen DNA-Abschnitte zwischen den Genen mühsam danach absucht, ob irgendwo Sequenzen vorkommen, die einem bekannten Gen gleichen. Schwerer lässt sich nachweisen, dass eine verdächtige Sequenz wirklich keine Funktion hat.

Die verschiedensten schädlichen Mutationen können aus einem Gen ein Pseudogen machen. Im Grunde kann der Defekt jede Stufe der Proteinherstellung treffen. Unter Umständen sieht man dem Pseudogen an, wo der Fehler liegt. Genetiker suchen etwa nach vorzeitig auftauchenden Stoppcodons. Auch kommt es vor, dass in die Sequenz ein zusätzlicher Baustein eingegliedert wurde oder einer verschwand. Dann stimmt das Leseraster für den genetischen Kode nicht mehr (siehe Kasten S. 60/61 unten).

Wieder etwas anderes ist der reine Austausch einzelner Bausteine der genetischen Sequenz. Nicht alle solche Mutationen wirken sich auf die Genfunktion aus. Der Biomathematiker Motoo Kimura entwarf in den 1960er Jahren die Theorie, dass es neutrale Mutationen gibt, die für die natürliche Selektion unwichtig sind. Entsprechend bleibt bei einem so genannten synonymen Austausch eines DNA-Bausteins die kodierte Aminosäure des Proteins gleich, das Protein somit unverändert. Es ist einsichtig, dass ein Gen unter Selektionsdruck fast nur solche Mutationen verträgt. Für funktionslose Sequenzen sollte das egal sein. Sie

## Viele verzerrte Spiegelbilder

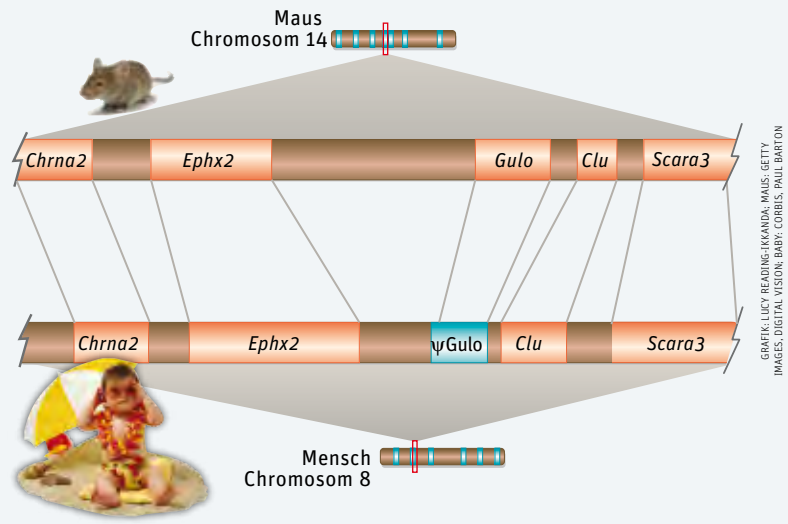
**Die zahlreichen Pseudogen-Abkömmlinge** (türkis und blau) des Gens für ein ribosomales Protein (orange) verteilen sich fast über das gesamte menschliche Genom – weit gehend anscheinend zufällig. Einzelne Regionen scheinen jedoch mehr davon zu enthalten – als ob sie solche Relikte besser bewahren können. Bislang haben Forscher beim Menschen 21 000 funktionale Gene gefunden sowie 19 000 Pseudogene. Rund 8000 der Scheingene entstanden anhand von prozessierter RNA, die ins Genom zurückgeschrieben wurde. Viele der anderen kamen bei oder nach einer Genduplikation zu Stande.



## Verlorene Vitamin-C-Synthese

**In der Regel ähneln sich** die Genome verwandter Organismen stark. So weist der gezeigte Chromosomenabschnitt bei Mensch und Maus im Prinzip die gleichen funktionalen Gene (orange) auf. Doch das Mausgen *Gulo* kommt beim Menschen nur noch als Pseudogen ψGulo vor (türkis).

Solche Unterschiede können wichtige Evolutionsschritte bezeichnen. Das Gen *Gulo* zum Beispiel kodiert für das Enzym zum letzten Schritt der Vitamin-C-Synthese. Anscheinend ging jenes Enzym den Primaten schon vor über 40 Millionen Jahren verloren.




GRAFIK: LUCY READING-IKKANDA; MAUS: GETTY IMAGES; DIGITAL VISION; BABY: CORBIS, PAUL BARTON

müssten viel eher auch andere Verwechslungen einzelner Bausteine enthalten.

Als die Forscher allerdings Pseudogene bei verschiedenen Arten verglichen, fanden sie diese These nicht immer bestätigt: Manche der Scheingene hat die Zeit nicht so stark abgewandelt, wie ohne Selektionsdruck zu erwarten wäre. Sollten diese Sequenzen doch noch irgendwelche Aufgaben erfüllen? Tatsächlich wiesen kürzlich Tomas Gingeras von der Firma Affymetrix und Michael Snyder von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) nach, dass auch beträchtliche Bereiche der nicht gentragenden Abschnitte des menschlichen Genoms in RNA umgesetzt, also transkribiert werden: Über die Hälfte der intensiv transkribierten DNA-Sequenzen scheinen außerhalb bekannter Gene zu liegen. Davon überlappen nicht wenige mit Pseudogenen. Sollten diese Sequenzen doch nicht völlig tot sein?

Unsere Arbeitsgruppe gehört zu einem Zusammenschluss von Labors, die das »dunkle Genom« erforschen. Wir bauen gerade ein Projekt namens »Encode« (für: Enzyklopädie der DNA-Elemente) auf, das darauf abzielt, alle Teile des Genoms zu identifizieren und deren Funktionen zu bestimmen. Nach den schon vorhandenen Daten sieht es so aus, als würde im menschlichen Erbgut mindestens jedes zehnte Pseudogen tatsächlich transkribiert. Natürlich besagt das noch nichts über eine Funktion. Aber womöglich werden manche Pseudogene wirklich noch irgendwie gebraucht und dürfen deshalb nicht frei mutieren.

### Unerwartete Einmischung

Möglich wäre zum Beispiel, dass sie bei der Steuerung von Genaktivitäten mitwirken. Viele der Gene höherer Organismen kodieren nicht für Proteine, sondern ihre RNA-Transkripte kontrollieren andere Gene. Sie können diese aktivieren oder hemmen – oder sie verhindern, dass an deren Transkript Proteine entstehen. Wir kennen mittlerweile zumindest zwei Beispiele von Pseudogenen, die sich so verhalten.

Eines fand die Gruppe von Michael O'Shea von der Universität Sussex (England) im Jahr 1999 bei einer Schlammschnecke. Die Tiere besitzen zu dem Gen für ein Enzym – die Stickstoffmonoxidsynthetase (NOS) – auch ein verwandtes Pseudogen. Beide werden in Nervenzellen transkribiert, aber die RNA vom Pseudogen hemmt die Bildung des Enzyms an der RNA des regulären Gens. ▷




# Ein starker Jahrgang ...

... ist die CD-ROM 2006 von **Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das spektrumdirekt-Archiv mit über 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum der Wissenschaft Wissen aus erster Hand

## Die schlechte Nase des Menschen

**Die feinen Zilien** der menschlichen Riechschleimhaut (Bild) tragen Unmengen von Rezeptormolekülen, die Duftstoffe einfangen. Bei den Säugetieren umfasst die Genfamilie für diese Rezeptoren mehr als tausend Gene. Nur ein Teil davon funktioniert noch beim Menschen. Viele aber sind als Pseudogene noch vorhanden.

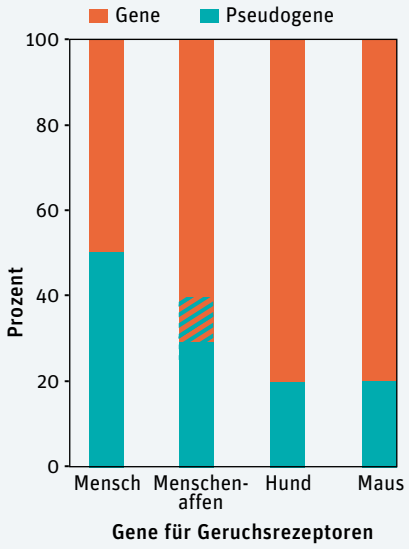


FOTO: RICHARD COSTANZO, VIRGINIA COMMONWEALTH UNIVERSITY; GRAFIK: LUCY READING-IKKANDA

▷ Das andere Beispiel entdeckte Shinji Hirotsune von der Saitama Medical School (Japan) im Jahr 2003. Er untersuchte Ursachen für Fehlbildungen bei Mäusen. In einem Fall fiel das wichtige regulatorische Gen *Makorin1* aus – obwohl der Forscher dieses gar nicht hatte manipulieren wollen. Unwissentlich hatte er aber das Makorin1-Pseudogen verändert.

Wenigstens zwei Dutzend Pseudogene verdächtigen die Forscher bisher, irgendwie aktiv zu sein – oft wohl nur in bestimmten Zellen. Viele Scheingene sind ihrem Herkunftsgen so ähnlich, dass man glauben möchte, es könnte weitere Paare geben, von denen die eine Sequenz für ein Protein kodiert und die andere den Zwilling kontrolliert. Dass solch ein Zusammenspiel von Anfang an bestand, ist allerdings unwahrscheinlich. Eher dürfte es zufällig durch günstige Mutationen aufgekommen sein. Denkbar wäre auch, dass Selektionskräfte irgendwann Mechanismen hervorbrachten, ausgesonderte Genwracks noch zu verwerten.

Von der Ära der molekularen Paläontologie dürfen wir noch viel Spannendes erwarten, hat sie doch kaum eingesetzt. Wer weiß, was an Pseudogenen noch auftauchen wird und welche weiteren Überraschungen sie bereithalten? Forschergruppen treiben die Suche nach ihnen nun stark voran. Hauptsächlich ist das eine Frage des Umgangs mit den riesigen Datenmengen. Die Genetiker bauen dabei weit gehend auf Sequenzvergleiche mit gut untersuchten Genen. Junge Pseudogene sind so nicht schwer zu finden. Wahrscheinlich übersehen wir aber sehr alte, stark verstümmelte Relikte. Die Arbeit dürfte jedoch umso leichter werden, je besser, vollständiger und genauer das menschliche Genom erfasst und analysiert ist.

Aufregend ist nicht nur, dass in manchen Pseudogenen vielleicht noch ein Rest Leben steckt. Denn nach einigen Hinweisen mögen auch reguläre Gene für Proteine existieren, die früher tot waren und sozusagen wieder aufgelebt sind. Wie sorgfältige Sequenzvergleiche eines Enzymgens von Rindern für eine Ribonuklease ergaben, war das lange Zeit ein Pseudogen und wurde erst in jüngster Zeit reaktiviert.

Zudem sind die Pseudogenmuster bei verschiedenen Menschen nicht unbedingt gleich. Nimmt man etwa die Geruchsrezeptoren, so verfügen einzelne Personen durchaus über – einige wenige – arbeitende Gene, zu denen die meisten von uns nur die Pseudoversion besitzen. Zu Stande kommen könnte so etwas, wenn eine zufällige Mutation den Defekt einer Sequenz rückgängig macht. Noch können wir jedoch nicht sagen, ob dieser unerwartete Befund das bekanntlich unterschiedliche Geruchsvermögen verschiedener Individuen erklärt.

Unsere eigenen Untersuchungen ergaben aber, dass Hefen in einer sie stressenden neuen Umwelt einige Pseudogene reaktivieren, die sich von Genen für Oberflächenproteine herleiten. Selbst davon abgesehen, dass diese abgestorbenen Sequenzen faszinierende Einblicke in unsere evolutionäre Vergangenheit gewähren, sind sie wohl keineswegs überflüssig. Sie könnten ein Reservoir darstellen, aus dem bei Bedarf neue Gene erstehen. Wie wertvoll die Pseudogene heute oder morgen für uns sind, wird zukünftige Forschung erweisen. ◁

**Mark Gerstein** (oben) und **Deyou Zheng** sind Biomathematiker. Gerstein hat die A.-L.-Williams-Professur für Biomedizinische Informatik an der Yale-Universität in New Haven (Connecticut). Zugleich ist er stellvertretender Leiter des Yale-Programms für Computerbiologie und Bioinformatik. Zheng kam 2003 nach seiner Promotion zu Gerstein. Er arbeitet dort über die Aktivität von Pseudogenen und deren Evolution.



Large-scale analysis of pseudogenes in the human genome. Von Z. Zhang und M. Gerstein in: Current Opinion in Genetics & Development, Bd. 14, Heft 4, August 2004, S. 328

Pseudogenes: Are they »junk« or functional DNA? Von E. S. Balakirev und F. J. Ayala in: Annual Review of Genetics, Bd. 37, Dez. 2003, S. 123

Das neue Genom. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2006

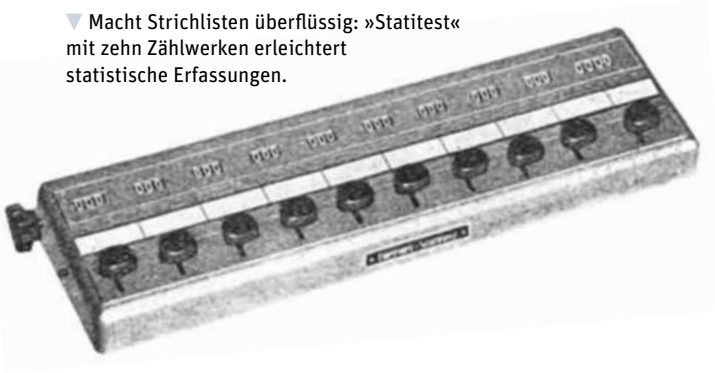

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/866416

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

1957

## Nie wieder Strichlisten

»Die Handhabung statistischer Verfahren in der Forschung erfordert die Aufstellung von Häufigkeitsverteilungen. Sie läßt sich mit Zählgeräten schneller und vollkommener bewerkstelligen als mit Strichlisten. Die Häufigkeiten der Merkmale werden dann direkt auf Zählsätze mit 6 oder 8 oder 10 Zählwerken eingetastet. Da man nicht mehr durch das Stricheln abgelenkt ist und die Masse der Werte blind eintasten kann, werden auch differenzierte Zählungen bei Erscheinungen erfaßbar, bei denen in einer Sekunde mehrere Einheiten zu zählen sind.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, 10. Jg., Heft 4, S. 151, April 1957*



▼ Macht Strichlisten überflüssig: »Statitest« mit zehn Zählwerken erleichtert statistische Erfassungen.

## Zähnebohren ohne Schmerzen

»Ein Hochleistungsbohrgerät für Zahnärzte mit Hartmetallbohrern und pneumatischem Antrieb wurde vor kurzem den Zahnärzten aus aller Welt vorgeführt … Mit diesem Gerät soll das Zahnbohren so gut wie schmerzlos sein. … In den Halter ist eine Luftturbine eingebaut, welche dem Bohrer eine Geschwindigkeit von 50 000 Umdrehungen pro Minute verleiht … und ein vibrationsfreies Arbeiten ergibt. Die hohe Umdrehungsgeschwindigkeit vermindert in Verbindung mit den Hartmetallbohrern den erforderlichen Druck auf ein Dreissigstel des normalerweise Erforderlichen und gibt dem Patienten die Empfindung einer federleichten Berührung.« *Neuheiten und Erfindungen, 24. Jg., Nr. 268, S. 54, April 1957*

## Diät gegen Geisteskrankheit

»Wir wissen heute, daß die Aminosäure Phenylalanin von der Leber normalerweise zu Tyrosin umgebaut wird. … Fehlt ein bestimmtes Ferment (wie bei manchen geistig unterentwickelten Kindern), so bleibt der Umbau aus und Phenylalanin nebst seinem Abbauprodukt Phenylbrenztraubensäure werden im Urin ausgeschieden. Diese Substanzen scheinen, wenn sie vermehrt im Blut auftreten, für das Nervensystem sehr toxisch zu sein. … Rickel sowie Woolf … gaben kranken Kindern nur Nahrungsmittel, die kein Phenylalanin enthielten. In allen Fällen trat klinisch eine auffallende Besserung ein. Diese Ernährungsweise ist jedoch sehr schwierig und kostspielig, da Phenylalanin in fast allen Eiweißen enthalten ist.« *Umschau, 57. Jg., Heft 8, S. 248, April 1957*

## Hilft Kaffee beim Verdauen?

»Neuerdings wurden in der Biologischen Abteilung des Pathologischen Instituts der Berliner Universität nach dieser Richtung hin Versuche an Hunden angestellt. Es handelte sich darum festzustellen, ob der Kaffee die Absonderung des Magensaftes befördere. Die Versuche zeigten, daß das in der Tat in sehr starkem Maß der Fall ist. … Anders verhält sich der Tee; er hemmt die Absonderung des Magensaftes und beeinträchtigt somit die Magenverdauung … Diese Versuche scheinen also dafür zu sprechen, daß die vielfach geübte Sitte, nach einer reichlichen Mahlzeit eine Tasse Mokka zu schlürfen, einen triftigen physiologischen Grund hat.« *Die Gartenlaube, Nr. 6, S. 134, 1907*

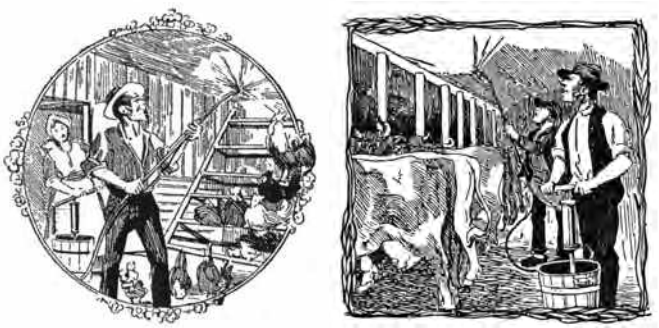
## Antifeministische Professoren

»Die allmähliche Freigabe unserer Hochschulen für die Frauen ist eine unabweisbare Forderung der Zeit. … Angenommen, es hätte nur ein kleiner Bruchteil aller Frauen die Fähigkeit, wissenschaftliche Berufe auszuüben, so müßte doch für diesen Bruchteil die Pforte zur Universität geöffnet bleiben. …Deshalb ist es nicht zu billigen, wenn noch heute eine nicht geringe Anzahl von Professoren es von vornherein ablehnt, akademischen Unterricht an Studentinnen zu erteilen. … Ohne daß man die natürlichen Verschiedenheiten von Mann und Weib zu leugnen braucht, muß man doch anerkennen, daß schon sehr tüchtige wissenschaftliche wie praktische Arbeiten von Frauen geleistet worden sind.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 82, S. 55, April 1907*

## Tünchmaschine »Fix«

1907

»Die Erfahrung hat gelehrt, dass Unreinlichkeit die Vorbedingung der meisten Tierkrankheiten ist … Es ist mit Freuden zu begrüßen, dass eine Stalldesinfektions-Einrichtung auf den Markt gebracht wird, mit deren Hilfe eine bequeme und gründliche Desinfektion aller Räumlichkeiten bis in den letzten Winkel vorgenommen werden kann. … Mit diesem Apparat ist es möglich, jede Flüssigkeit unter mindestens 8 Atmosphären Druck entweder strahlförmig oder nebelartig zu verspritzen. … Kuh-, Schweine- und Geflügelställe können damit gründlich desinfiziert und geweisst werden.« *Deutsche Export-Revue, No. 2, S. 71, April 1907*



▲ Die Tünchmaschine »Fix« desinfiziert und weißt Ställe.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

SIMULATIONEN: W. WAYT GIBBS; MODELLE MIT FRDL. GEN. VON DAZ PRODUCTIONS INC. UND INGO WALD, UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

# 3-D-Grafik – der große Sprung

Die dreidimensionale Computergrafik erlebt derzeit einen enormen Zuwachs an Bildqualität – vor allem dank schnellerer Verfahren für die Simulation der Lichtausbreitung.

**Schnelle Algorithmen und Spezialchips für Ray-Tracing können heute Bilder selbst von komplexen und sich schnell ändernden Szenen (obere Bildzeile) in einer Zeit erzeugen, die bisherige Software für ein Einzelbild benötigt (untere Bildzeile).**

Von W. Wayt Gibbs

Diejenigen unter uns, die ihre prägenden Jahre damit verschwendet haben, eckige »Space Invaders« abzuschießen, stehen heute mit großen Augen und offenem Mund vor aktuellen Computerspielen. Der primitive, pixelige Affe »Donkey Kong« hat sich zu einem dreidimensionalen »King Kong« mit verblüffenden Details verwandelt. Einige Spiele für die neue Xbox 360 stellen ihre Hauptdarsteller mit aufwändigen Netzen aus mehr als 20 000 Polygonen dar, von denen jedes Einzelne in jeder Sekunde dutzende Male mit raffinierten Materialien, Mustern und Glanz auf dem Bildschirm präsentiert wird.

Neben der boomenden Spiele-Industrie haben die Fortschritte der Grafiktechnologie auch der interaktiven Software für das Design und Ingenieurwesen zu neuen Leistungshochs verholfen. Selbst die Architektur, medizinische Bildverarbeitung und wissenschaftliche Visualisierung profitieren davon. Dies ist insbesondere der Entwicklung bei den Grafikprozessoren (Graphics Processing Units, GPUs) zu verdanken – jenen kleinen Chips im Computer, die dreidimensionale Szenen schneller in zweidimensionale Bilder verwandeln, als man schauen kann. Genauso schnell, wie die Leistung der GPUs in die Höhe schoss, taten das auch die Umsätze der Hersteller dieser Grafikchips wie etwa ATI/AMD, Nvidia oder Intel.

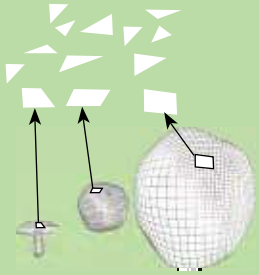
Trotzdem gibt es heute immer noch einen himmelweiten Unterschied zwischen interaktiver 3-D-Grafik auf der einen und Kinofilmen oder Fotografien auf der anderen Seite – insbesondere was Realismus und Überzeugungskraft der Bilder betrifft. Einige Experten meinen, dass das Nonplusultra der Computergrafik – in dem virtuelle Szenen die gleichen flüssigen Bewegungen und subtilen Details zeigen wie die Realität – nur mit einem fundamental neuen Ansatz erreicht werden kann. Ein Schwenk von so genannten Rasterisierungsverfahren, die in den GPUs für interaktive Grafik genutzt werden, hin zu dem physikbasierten Ray-Tracing-Verfahren zur Strahlverfolgung wurde von fast allen Experten lange als völlig unmöglich angesehen. Fortschritte bei Soft- und Hardware haben Ray-Tracing jetzt aber überraschend schnell in die Nähe des PC-Massenmarktes katapultiert.

Ray-Tracing, das quasi schon der Renaissance-Maler Albrecht Dürer einsetzte und das erstmals in den 1970er Jahren auf einem Computer implementiert wurde, steht jetzt vor seiner eigenen Renaissance, sagt Philipp Slusallek, Informatiker ▷

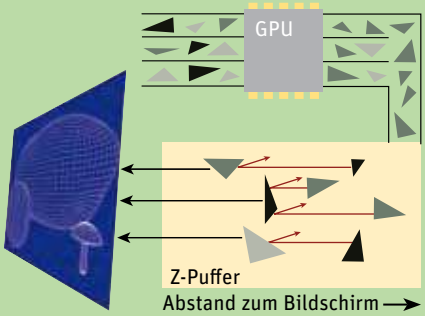
## Von schnellen Rastern zu Strahlen in Echtzeit

### Raster-Grafiken

Für das Rasterisierungsverfahren, wie es in den Chips heutiger Grafikkarten und Spielkonsolen verwendet wird, müssen die Objekte einer Szene zuerst in viele Polygone zerlegt werden (meist Dreiecke).



Im Chip durchlaufen die Polygone individuell eine Pipeline, in der die Geometrie transformiert und mit dem »Shading« die Farbgebung der Dreiecke berechnet wird. Ein Z-Puffer speichert pro Pixel die Entfernung zum dort sichtbaren Dreieck.

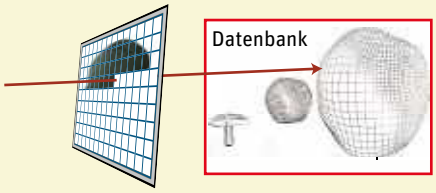



Da die GPU jedes Polygon isoliert betrachtet, müssen diese für jedes Bild oft mehrfach durch die Pipeline geschickt werden, um das Aussehen der Objekte mit Schatten, Transparenz, Reflexionen und anderen Effekten zu approximieren.

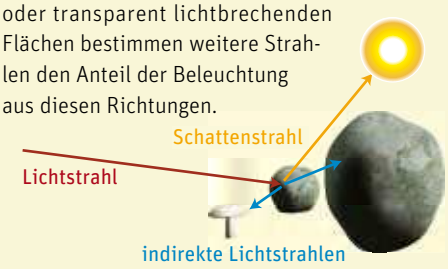
ALLE INFOGRAFIKEN: W. WAYT GIBBS; MODELLE MIT FRDL. GEN. VON DAZ PRODUCTIONS INC.

### Traditionelles Ray-Tracing

Ray-Tracing berechnet ein Bild der Szene, indem es virtuelle Strahlen durch die Pixel des 2-D-Displays schickt. Die Szene besteht dabei aus einer Datenbank, die eine Vielzahl an gekrümmten und flachen Objekten enthalten kann.




Trifft der Strahl ein Objekt, so kann das System einfach weitere »Schatten«-Strahlen zu jeder Lichtquelle schicken, um festzustellen, ob diese sichtbar ist oder der Punkt im Schatten liegt. Auch bei reflektierenden oder transparent lichtbrechenden Flächen bestimmen weitere Strahlen den Anteil der Beleuchtung aus diesen Richtungen.




Dank dieser rekursiven Berechnung können alle Lichteffekte in einem einzelnen Durchgang exakt und physikalisch korrekt berechnet werden.

▷ an der Universität des Saarlandes und einer der Hauptakteure der neuen Technologie. Die Zeit sei reif: »Das Rasterisierungsverfahren der GPUs ist in einer Sackgasse angekommen«, versichert der Professor.

Die Rasterisierung hat drei Hauptprobleme, die alle auf den ersten Schritt dieses Verfahrens zurückgehen: Die virtuelle Welt im Computer wird in eine Vielzahl kleiner, flacher Polygone zerlegt, etwa Dreiecke, die alle einzeln verarbeitet werden. Das erste Problem dabei ist, dass fast alle realen Objekte unterschiedlich stark gekrümmte Oberflächen haben und durch die Approximation mit ebenen Flächenstücken unnatürlich wirken.

Falls der Designer einer bestimmten Szene den Aufwand nicht scheut, könnte er zwar die Rundungen mit einer größeren Zahl an Dreiecken akkurater modellieren. Dies verschlimmert allerdings das zweite Problem: Das Rasterisierungsverfahren muss prinzipiell alle eventuell relevanten Polygone verarbeiten, selbst wenn diese am Ende gar nicht sichtbar sind. »Erst wenn das System das allerletzte Polygon dargestellt hat, kann es feststellen, ob diese letzte Fläche nicht vielleicht alle vorherigen hinter sich verdeckt«, erklärt Gordon Stoll, Grafikforscher bei Intel. Der Berechnungsaufwand steigt deshalb bei der Rasterisierung proportional zur geometrischen Komplexität einer Szene. Verdoppelt sich die Anzahl der Details, dann halbiert sich gleichzeitig die Rate, mit der eine GPU die Bilder berechnen und darstellen kann.

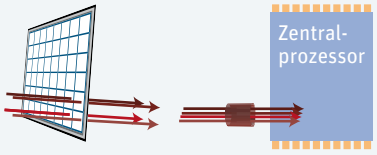
Ein drittes und noch wichtigeres Problem ist, sagt Slusallek, dass »Schatten, Reflexionen und andere globale Effekte überhaupt nicht korrekt mit Rasterisierung berechnet werden können«. Die Begründung, erklärt Stoll, »liegt in der falschen Annahme, dass Polygone unabhängig voneinander sind. Das Aussehen aller Objekte einer Szene hängt von allen anderen ab, da das Licht immer wieder zwischen ihnen reflektiert wird«. Informatiker sprechen bei diesem Problem von der »globalen Beleuchtungssimulation«. Neue GPUs können eine Szene zwar mehrfach darstellen, um die indirekten Beleuchtungseffekte zu approximieren. Dieser Trick verbraucht allerdings viel Speicher, verstopft interne Datenkanäle und erreicht trotzdem nicht den gewünschten Fotorealismus.

Ray-Tracing vermeidet diese Probleme, indem es die Lichtstrahlen selbst durch die Szene verfolgt. Wo Rasterisierung auf Tricks, Approximationen und manuelle Eingriffe angewiesen ist, simuliert Ray-Tracing die Gesetze der Optik – und mit der Physik kommt die Wirklichkeitstreue. »Die Lichtstrahlen sind wirklich unabhängig voneinander«, bemerkt Stoll, sodass Reflexionen, Schatten oder selbst Rauch bei Ray-Tracing-Bildern

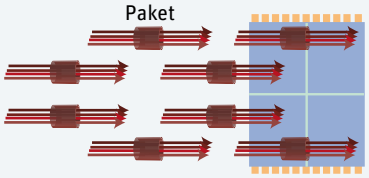
## Echtzeit-Ray-Tracing

Echzeit-Ray-Tracing wird bereits heute kommerziell in Servern eingesetzt, etwa in Visualisierungszentren der Automobilbranche, ist inzwischen aber auch im Konsumentenbereich verfügbar. Drei wesentliche Fortschritte haben dazu die Rechenzeit von Stunden auf Bruchteile von Sekunden pro Bild reduziert.

**1** Benachbarte Strahlen werden in Paketen zusammengefasst und in allen Stufen des Ray-Tracers parallel auf Desktop-PCs verarbeitet. So kann die hohe Parallelität in heutigen Standardprozessoren (SIMD/SSE-Berechnungen) optimal ausgenutzt werden. Auch müssen Daten nur einmal geladen und viele Berechnungen pro Paket nur einmal ausgeführt werden.

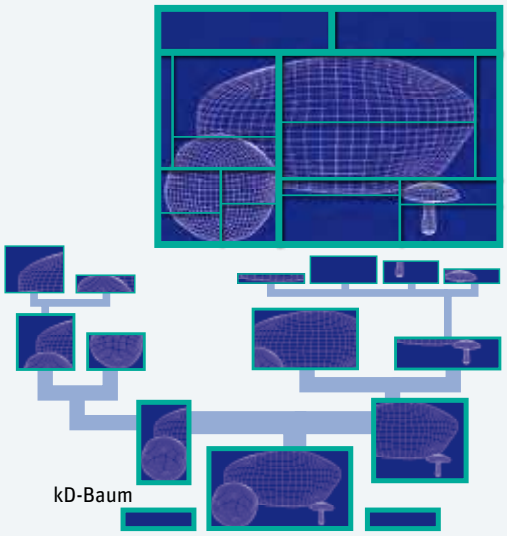



Jedes Paket wird in separaten »Threads« bearbeitet, die optimal auf moderne Multi-Core-CPUs verteilt werden können.




**2** Moderne Datenstrukturen wie so genannte kD-Bäume unterteilen den Raum der Szenen rekursiv in immer kleinere Teile, sodass jeder etwa einen ähnlichen Berechnungsaufwand erfordert.

Statt einen Strahl beziehungsweise ein Strahlenpaket daraufhin zu testen, ob jedes Objekt der Szene getroffen wird, untersucht der Ray-Tracer rekursiv immer nur die Teile des kD-Baums, durch die der Strahl verläuft. So muss er lediglich die Objekte in den Blättern des Baums testen, die nahe am Strahl liegen.




**3** Spezielle Mikrochips, die vor Kurzem an der Universität des Saarlandes entworfen wurden, laufen als Prototypen zwar erst mit 66 MHz, liefern aber schon jetzt die Leistung einer 40-fach schnelleren 2,6-GHz-CPU. Eine fast fertig entworfene Asic-Variante für den kommerziellen Einsatz soll mehr als die 50-fache Leistung liefern – für Echtzeit-Software mehr als genug.

MIT FRDL. GEN. VON PHILIPP SLUSALLEK, UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

**Test des RPU-Prototyps durch seine Erfinder an der Universität des Saarlandes**

auch so aussehen, wie man sie kennt. »Wenn ich diese Effekte in einem Ray-Tracer einschalte«, ergänzt der Intel-Forscher, »stimmen automatisch auch alle ihre möglichen Kombinationen, wie etwa die Reflexion des Schattens einer Rauchwolke. Das geht mit Rasterisierung so überhaupt nicht.« Nur mit Ray-Tracing könne bisher die globale Beleuchtung fast perfekt berechnet werden.

Als das Pixar Animation Studio anfing, den Film »Cars« zu produzieren – einen computergenerierten Film, der letztes Jahr in unsere Kinos kam –, mussten die Mitarbeiter feststellen, dass die metallischen Oberflächen der Wagen nur dann perfekt glänzten, wenn statt der bisherigen Rasterisierung Ray-Tracing eingesetzt wurde. Bei allen früheren Filmen hatte Pixar es vermieden, Ray-Tracing zu verwenden – aus dem gleichen Grund, der den Einsatz auch bei Computerspielen und anderen interaktiven Systemen verhindert hat: Der durch die Physik bedingte Rechenaufwand hatte bisher alle Rechner in die Knie gezwungen.

Selbst Pixars großes Netzwerk von über 3000 der schnellsten Computer rechnet für jede einzelne Sekunde des fertigen Films mehrere Tage lang. Während Filmproduzenten so etwas vielleicht noch tolerieren können, geht das bei Spielern, Ingenieuren und Medizinern im Allgemeinen nicht mehr.

### Besser mit Echtzeit-Ray-Tracing

Ray-Tracing setzt jetzt allerdings zum Sprung über diese Geschwindigkeitshürde an. Bessere Algorithmen und spezielle Hardware haben Ray-Tracing in kürzester Zeit um mehr als zwei Größenordnungen beschleunigt. Durch Echtzeit-Ray-Tracing können Computerbilder viel einfacher und gleichzeitig mit einer deutlich besseren Qualität erzeugt werden.

Schon im Jahr 2003 war Slusallek so von der Marktfähigkeit dieser Technologie überzeugt, dass er mit seinen Mitarbeitern eine Spin-off-Firma gründete, um sie für die Industrie auch kommerziell verfügbar zu machen. Sie gründeten die inTrace GmbH. Die erste Generation der Software benötigte noch einen Cluster schneller Computer, um hochauflösende, fotorealistische Ansichten mit mehr als zehn Bildern pro Sekunde zu erzeugen. Fast alle deutschen Automobilfirmen wie BMW, Audi, DaimlerChrysler, Volkswagen, aber auch Airbus und andere Firmen griffen bei inTrace zu.

Sie benutzen die OpenRT-Software derzeit zur visuellen Evaluation von neuen Automodellen, zur Bewertung von Designentscheidungen, noch bevor das erste Modell gebaut werden kann, und zur finalen Oberflächenkontrolle mittels Reflexionen. Seitdem wurden die Ray-Tracing-Algorithmen des OpenRT-Sys- ▷

**In diesem originalen 3-D-Modell einer Boeing 777 sind alle Schrauben, Schalter und Kabel sichtbar. Eine Szene dieser Komplexität überfordert traditionelle Rasterisierungsverfahren, die für jedes Bild jedes der 350 Millionen Polygone bearbeiten. Da Ray-Tracing-Systeme nur mit den sichtbaren Objekten rechnen, sind selbst solche Modelle einfach darzustellen.**

PHILIPP SLUSALLEK, UNIVERSITÄT DES SAARLANDES; MODELLE MIT FRDL. GEN. DER BOEING COMPANY

tems so verbessert, dass interaktive Bildraten sogar schon auf einem leistungsstarken PC erreicht werden. 2004 zeigten Slusallek und seine Mitarbeiter Carsten Benthin und Ingo Wald, wie man mit Ray-Tracing große Szenen voll gekrümmter Freiformflächen (so genannte Spline-Flächen), wie sie im Automobilbau Verwendung finden, sehr schnell darstellen kann. Diese müssen dabei nicht mehr in viele Dreiecke zerlegt werden, wie das für GPUs und klassische Ray-Tracer noch notwendig war. In den letzten zwei Jahren haben Slusallek, Stoll und Wald (inzwischen an der Universität von Utah) jeweils neue Wege aufgezeigt, wie man diejenigen Objekte noch schneller identifizieren kann, die höchstwahrscheinlich von einem Strahl auf dessen Weg vom Bildschirm zur Lichtquelle getroffen werden (um Rechenzeit zu sparen, wird das Licht rückwärts verfolgt, die Physik bleibt jedoch die gleiche).

## Büchersuchen in einer Bibliothek

Will man feststellen, ob ein Strahl ein bestimmtes Objekt auch trifft, sagt Slusallek, gleiche dies der Suche nach einem Buch in einer Bibliothek. »Auch da fängt man nicht am ersten Regal oben links an und arbeitet sich dann durch die ganze Bibliothek. Man benutzt den Katalog, den Index, und geht dann direkt zum richtigen Regal.« Einen Index für 3-D-Objekte aufzubauen ist einfach. Schwierig ist jedoch, es innerhalb weniger Millisekunden zu tun, und zwar jedes Mal, wenn sich etwas in der Szene verändert hat und bevor das nächste Bild dargestellt wird. »Es ist, als ob die Bücher ständig umsortiert würden«, sagt er. Stoll und sein Kollege Jim Hurley bei Intel arbeiten an Verbesserungen des klassischen Indexes, bekannt als ein »kD-Baum«. Ein kD-Baum unterteilt den Raum wiederholt in je zwei kleinere Teile und arrangiert ihn so in eine baumartige 3-D-Hierarchie. Um Zeit zu sparen, baut das so genannte Razor-System von Intel nur die für das jeweilige Bild benötigten Äste des Baums neu auf. Sein kd-Baum repräsentiert die Szene in mehreren Auflösungsstufen, sodass es zum Beispiel ein entferntes Schloss schnell darstellen kann, ohne jeden einzelnen Ziegelstein anfassen zu müssen.

»Razor ist ein weit reichendes Testsystem«, meint Hurley. »Es kann Explosionen, spritzendes Wasser und den ganzen Bereich der Lichteffekte berechnen. Es ist zwar noch nicht schnell, aber durch Optimierungen erwarten wir eine Beschleunigung um den Faktor 10 bis 100.« Die Optimierungen sollen auch die Möglichkeit moderner Multi-Core-Prozessoren nutzen, die mehrere Programmteile gleichzeitig ausführen können.

Letztes Jahr hat die Forschergruppe aus dem Saarland einen Chip entwickelt, der viele Ray-Tracing-Berechnungen parallel bearbeiten kann. In ersten Tests konnte die »RPU« (Ray Processing Unit) schon Dutzende von Bildern pro Sekunde erzeugen. Um die Möglichkeiten zu demonstrieren, haben zwei Studenten von Slusallek eine virtuelle Insel mit 40 Millionen Polygonen modelliert, zum Beispiel auch mit den Ozeanwellen, die nachts den Sternenhimmel und die Lagerfeuer am Strand reflektieren. »Das schafften die beiden in etwa drei Monaten«, berichtet er. »Durch Ray-Tracing kann man auf alle manuellen Tricks verzichten, die man wegen des Rasterisierungsverfahrens heute in Spielen noch braucht. Mit Ray-Tracing baut man einfach das Modell, drückt einen Knopf und das perfekte Bild ist fertig.« Slusallek plant, die neue RPU-Hardware mit Treibern und Compilern für die Industrie zu kommerzialisieren.

»Die Technologie, um hochdetaillierte, realistische Szenen in Echtzeit darstellen zu können, ist jetzt endlich verfügbar«, sagt der Saarländer. »Jetzt wird sich zeigen, auf welcher Hardware-Plattform sie zukünftig am besten funktioniert: Multi-Core-CPUs, Ray-Tracing-Erweiterungen für künftige GPUs oder eben Spezialprozessoren wie unsere RPU.« Eines scheint aber klar: Die enorme Beschleunigung der Ray-Tracing-Technologie signalisiert einen großen Sprung in der Computergrafik.

**W. Wayt Gibbs** ist freier Mitarbeiter von Scientific American.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Razor: An architecture for dynamic multiresolution Ray tracing. Von Gordon Stoll et al. University of Texas at Austin, Department of Computer Sciences Technical Report #TR 06-21, 2006

Ray tracing goes mainstream. Von Jim Hurley in: Intel Technology Journal, Bd. 9, Ausg. 22, Mai 2005

RPU: A programmable Ray processing unit for realtime ray tracing. Von Sven Woop, Jörg Schmittler und Philipp Slusallek in: Proceedings of ACM Siggragph, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/866421

# Die Mathematik der doppelten Gerechtigkeit

Für ein Zuteilungsproblem, bei dem zwei konkurrierende Forderungen zugleich zu erfüllen sind, gibt es eine algorithmische Lösung. Sie ist so überzeugend, dass sie – unter anderem – für die Besetzung des Zürcher Gemeinderats praktiziert wird.

Von Michel Balinski
und Friedrich Pukelsheim

Wir haben das Vergnügen, über eine geradezu bilderbuchmäßig erfolgreiche Anwendung von Mathematik zu berichten. Einer der Autoren, Michel Balinski, erarbeitet in der Theorie eine Lösung eines Problems, an dem sich die mexikanische Legislative jahrelang vergeblich abgemüht hat. Der andere Autor, Friedrich Pukelsheim, arbeitet diese Lösung weiter aus und stellt sie auf seiner Website bereit. Wir beide veröffentlichen unsere Gedanken in der vorliegenden Zeitschrift (Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 72 und 75).

Auf der Suche nach der Lösung eines gleichartigen Problems stößt Christian Schuhmacher, Leiter des Gesetzgebungsdiensts in der Verwaltung des Kantons Zürich, auf unsere Arbeiten. Es ist uns ein Leichtes, unsere Lösung den Zürcher Gegebenheiten anzupassen. Die vorbereitende parlamentarische Kommission und der Kantonsrat machen sich unseren Vorschlag mit großer Einmütigkeit zu eigen. Das »Neue Zürcher Zuteilungsverfahren« wird zum Gesetz und bei der Wahl zum Zürcher Gemeinderat am 12. Februar 2006 erstmals angewandt.

Es geht darum, die Parlamentssitze so zuzuteilen, dass die Wahlkreise proportional zu den Bevölkerungszahlen repräsentiert werden und die Parteien proportional zu ihren Stimmengewinnen. Im Parlament sollen also nicht nur von jeder Partei so viele Vertreter sitzen, wie ihrem Stimmenanteil am Gesamtergebnis entspricht, sondern auch von jedem Wahlkreis (jeder Region, jedem Bundesland …) so viele Vertreter, wie dessen Anteil an der Gesamtbevölkerung entspricht. Das Neue Zürcher Zuteilungsverfahren ist vor allem deswegen so überzeugend, weil es – mathematisch beweisbar – keine Umverteilung der Sitze gibt, durch die man dem Ideal der doppelt proportionalen Repräsentation näher käme.

## Atemberaubendes Tempo des Schweizerischen Bundesgerichts

Bis 2002 wurden bei den Wahlen für den Zürcher Gemeinderat die Vertreter jedes Wahlkreises ausschließlich aus den in diesem Wahlkreis abgegebenen Stimmen ermittelt. Da beispielsweise der Wahlkreis 1 wegen seiner geringen Wählerzahl nur zwei Vertreter in den Gemeinderat zu entsenden hatte, war jede Stimme, die in diesem Wahlkreis für eine der kleineren Parteien abgegeben wurde, von vornherein wertlos, obgleich für dieselbe Partei im gesamten Stadtgebiet mehr als genügend Stimmen für einen Gemeinderatssitz zusammenkamen. Gegen diese Ungleichbehandlung legte nach der Wahl im März 2002 ein Bürger beim Schweizerischen Bundesgericht Beschwerde ein – mit Erfolg. Nach nur neun Monaten gab das Bundesgericht der Beschwerde statt (während das deutsche Bundesverfassungsgericht nach vier Jahren noch nicht einmal die Einsprüche gegen die vorletzte Bundestagswahl von 2002 erledigt hat). Das war der Auslöser einer Suche nach Abhilfe, die in dem beschriebenen Gesetz endete.

Zürich mit seinem neuen Zuteilungsverfahren macht den Anfang, die Kantone Aargau und Schaffhausen erwägen zu folgen. Darüber hinaus sind doppelt proportionale Sitzzuteilungsverfahren überall von Interesse, wo die Zusammensetzung des Parlaments neben der parteipolitischen Landschaft auch die regionale Bevölkerungsaufteilung widerspiegeln soll. Das gilt für Belgien mit seiner Sprachenvielfalt ebenso wie für die Färöer-Inseln, die in der dänischen Reichsgemeinschaft einen hohen Grad an Autonomie genießen, und für die Europäische Union, deren Mitgliedstaaten ihre nationale Repräsentation im Europäischen Parlament garantiert sehen wollen.

Früher bildete jeder der zwölf Bezirke (»Stadtkreise«) Zürichs einen Wahlkreis für sich, wobei auf Kreis 1 nur besagte zwei Sitze entfielen. Für die Wahl 2006 wurden die drei kleinen Kreise 1, 5 und 8 mit größeren zusammengelegt, um Kleinstwahlkreise zu vermeiden. Nach der Neugliederung entsendet jeder Wahlkreis entsprechend seiner Bevölkerungszahl 10 bis 19 Abgeordnete ins Stadtparlament.

Jeder Wähler hat so viele Stimmen, wie in seinem Wahlkreis Sitze zu vergeben sind. Um die Stimmen im Wahlgebiet auf einen Nenner zu bringen, werden die Stimmenzahlen in jedem Wahlkreis durch die Wahlkreisgröße (die Anzahl der

BEIDE FOTOS: MARTIN ZACHARIASEN, UNIVERSITÄT KOPENHAGEN

**Der Autor Friedrich Pukelsheim beobachtet gespannt die Auszählung der Ergebnisse der Zürcher Gemeinderatswahl am 12. Februar 2006, die erstmals nach dem von ihm ausgearbeiteten Neuen Zürcher Zuteilungsverfahren abläuft.**

auf diesen Wahlkreis entfallenden Sitze) geteilt und zur nächstgelegenen ganzen Zahl gerundet. Das Ergebnis sind die »Wahlkreiswählerzahlen« (Tabelle S. 78). Für die folgende Diskussion können wir mit vernachlässigbarem Fehler unterstellen, jeder Wähler hätte genau eine Stimme und die Wahlkreiswählerzahlen wären die Anzahlen dieser Stimmen.

Das neue Zuteilungsverfahren rechnet in zwei Schritten. Für die »Oberzuteilung« werden die Wahlkreiswählerzahlen einer Partei über alle neun Wahlkreise aufsummiert. Proportional zu diesen kumulierten »Wählerzahlen« sollen die zu vergebenden Sitze den Parteien zugeteilt werden, und zwar zunächst ohne Rücksicht auf die Verhältnisse in den einzelnen Wahlkreisen. Das ist eine einfache Dreisatzaufgabe. Da insgesamt 66 327 Stimmen für 125 Sitze abgegeben wurden, entfallen auf jeden Sitz 66 327 / 125 = 530,616 Wählerstimmen.

Man teile die Stimmenzahl jeder Partei durch 530,616 und erhält die dieser Partei zustehende Sitzzahl. Da das im Allgemeinen keine ganze Zahl ist, muss gerundet werden: Aus dem Quotienten 43,68 für die SP (Sozialdemokratische Partei) ergeben sich 44 Sitze; der Quotient 3,19 für die SD (Schweizer Demokraten) wird zu 3. Das ist die auch im kaufmännischen Bereich übliche Standardrundung. Andere Verfahren, etwa Abrunden zur nächstniederen ganzen Zahl, werden auch praktiziert, haben aber erhebliche Nachteile (siehe unten).

Wegen der Rundung ergeben die so errechneten Sitzzahlen möglicherweise nicht genau die geforderte Gesamtzahl (in diesem Fall 125). Dem kann man abhelfen, indem man den »Stadtdivisor« 530,616 geeignet verändert. Macht man ihn beispielsweise kleiner, so werden die Quotienten größer, bis einer von ihnen die entscheidende Grenze »ganze Zahl plus 0,5« überwindet und nach oben statt nach unten gerundet wird, wodurch die Gesamtzahl der Sitze um 1 steigt.

Theoretisch kann sich dieses Umspringen bei zwei Quotienten zugleich ereignen, etwa wenn zwei Parteien exakt die gleiche Stimmenzahl errungen haben. In diesem Fall würde die Sitzzahl gleich um 2 ansteigen und damit möglicherweise den geforderten Wert verfehlen. In der Praxis sind diese Fälle ohne Bedeutung. Die meisten Wahlgesetze schreiben vor, dass solche Pattsituationen durch Losentscheid aufzulösen sind.

## Subtile Balance zwischen zwei Zielen

In unserem Beispielfall muss der Divisor 530,616 gar nicht nachgebessert werden. Alle Divisoren zwischen 528,206 und 532,873 reproduzieren die in der Tabelle aufgeführten Sitzzahlen.

Für das weitere Verfahren sind diese Gesamtsitzzahlen für die Parteien ebenso als konstant anzusehen wie die vorab festgelegten Wahlkreisgrößen.

Der zweite und neue Schritt des Verfahrens ist die »Unterzuteilung«; hier werden die Sitze jedes Wahlkreises den Parteien entsprechend ihrer Stimmenzahl in dem jeweiligen Wahlkreis zugeteilt. Dabei gilt es sowohl die vorgeschriebenen Wahlkreisgrößen einzuhalten als auch die in der Oberzuteilung bestimmten Parteisitzzahlen auszuschöpfen. Weil es nun zwei Bedingungen zu erfüllen gilt, gibt es auch zwei Gruppen von Schlüsselzahlen: Wahlkreisdivisoren und Parteidivisoren.

Ansonsten folgt die Rechnung demselben Schema wie vorher, nur dass jetzt pro Wahlkreis und Partei die Wählerzahl zweimal geteilt wird, sowohl durch den zugehörigen Wahlkreisdivisor als auch durch den entsprechenden Parteidivisor. Schließlich wird der sich ergebende Quotient zur nächstgelegenen ganzen Zahl gerundet.

Randbedingungen (Wahlkreisgrößen und Parteisitzzahlen) sowie Zuteilungsschlüssel (Wahlkreis- und Parteidivisoren) bilden einen Rahmen um den Kern der Tabelle. Zum Beispiel ergibt sich in Wahlkreis 12 für die SP der Quotient 1322 / (400 · 1,01) = 3,27, der zu 3 Sitzen gerundet wird.

Wie ermittelt man die Schlüsselzahlen? Man berechnet zunächst für jeden Wahlkreis einen Wahlkreisdivisor, mit dem die Wahlkreisgröße ausge- ▷

▷ schöpft wird. Dabei ergeben sich in aller Regel noch nicht die richtigen Parteisitzzahlen. Daher berechnet man im zweiten Durchgang mit den soeben skalierten Wählerzahlen (man dividiert jede Wählerzahl durch den aktuellen Wahlkreisdivisor) Parteidivisoren, sodass die korrekten Parteisitzzahlen erreicht werden.

Wenn man jetzt jede Wählerzahl durch ihren zugehörigen Wahlkreis- und Parteidivisor teilt und dann rundet, stimmen im Allgemeinen die Wahlkreisgrößen nicht mehr. Also passt man diese an, indem man mit den skalierten Wählerzahlen (diesmal Wählerzahl durch aktuellen Parteidivisor) neue Wahlkreisdivisoren berechnet, und so weiter.

Es scheint so, als würde man ständig die eine Sorte Größen nachbessern und dabei in Kauf nehmen, dass die Größen der anderen Sorte verrutschen. Aber die gute Nachricht ist: Es rutscht sich zurecht. In unserem Fall ist nach fünf Durchgängen ein Ergebnis erreicht, das beide Bedingungen erfüllt. Die Rechenarbeit erledigt – zum Beispiel – ein Computerprogramm namens »Bazi«, das die Augsburger Mathematikergruppe frei benutzbar ins Internet gestellt hat (www.uni-augsburg.de/bazi).

Auf den ersten Blick sieht das Ergebnis etwas merkwürdig aus. Der zentrale Grundsatz der Erfolgswertgleichheit besagt, dass jede Wählerstimme den gleichen Beitrag zu einem Wahlerfolg haben soll, einerlei in welchem Wahlkreis oder für welche Partei sie abgegeben wird, oder, was auf dasselbe hinausläuft, dass für jeden Sitz, gleich für welche Partei und welchen Wahlkreis, ungefähr die gleiche Anzahl an Stimmen erforderlich sein soll, in unserem Beispiel eben 530 Stück. Da wirkt es seltsam, dass in Wahlkreis 9 der SP 2628 Stimmen für sechs Sitze genügen, während dieselbe Partei in Wahlkreis 10 für 2938 Stimmen nur lumpige vier Sitze bekommt. In Kreis 11 sind für 777 Stimmen schon zwei CVP-Sitze zu haben, im Kreis 7-8 gibt es für deutlich mehr, nämlich 837 Stimmen, nur einen Sitz. Im selben Wahlkreis ist die FDP wesentlich billiger, nämlich mit 603 Stimmen pro Stück, an ihre fünf Sitze gekommen.

Und schon argumentiert die CVP, im Wahlkreis 7-8 stünde ihr auf Kosten der FDP ein Sitz mehr zu; denn dann käme die Aufteilung dem Prinzip der Erfolgswertgleichheit wesentlich näher. Oder der SP-Kandidat aus Kreis 10, dessen Listenplatz gerade nicht mehr für einen Einzug ins Parlament gereicht hat, macht seinem Parteifreund aus Kreis 9 den gerade noch errungenen Stadtratssitz streitig. Was ist auf derlei Ansprüche zu erwidern?

## Vermeidung paarweiser Konflikte

Die Frage läuft auf die Eigenschaft der »Kohärenz« hinaus, die Michel Balinski in seinem Artikel »Die Mathematik der Gerechtigkeit« (Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 90) in allgemeinerem Zusammenhang diskutiert. Kohärenz bedeutet: Zwischen je zwei Parteien sollten die von beiden zusammen errungenen Sitze so aufgeteilt sein, dass beide das Ergebnis als unstrittig und gerecht empfin-

## Das Neue Zürcher Zuteilungsverfahren

**Die Zuteilung der 125 Sitze** bei der Zürcher Gemeinderatswahl am 12. Februar 2006 erfolgt in zwei Schritten. Für die Oberzuteilung werden die Wählerzahlen durch den Stadtdivisor geteilt und der resultierende Quotient zur Parteisitzzahl gerundet. Beispiel SP: 23180 / 530 = 43,74 ↗ 44 Sitze. In der Unterzuteilung werden die Wahlkreiswählerzahlen zweimal geteilt – durch den zugehörigen Wahlkreisdivisor wie auch durch den Parteidivisor – und erst dann gerundet. Beispiel SP in Wahlkreis 12: 1322 / (400 · 1,01) = 3,27 ↘ 3. Die Divisoren sind so berechnet, dass Wahlkreisgrößen und Parteisitzzahlen genau ausgeschöpft werden.

| | | SP | SVP | FDP | Grüne | CVP | EVP | AL | SD | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Oberzuteilung im gesamten Wahlgebiet (Wählerzahl Parteisitzzahl) | | | | | | | | | | Stadtdivisor |
| | | 23180 44 | 12633 24 | 10300 19 | 7501 14 | 5418 10 | 3088 6 | 2517 5 | 1692 3 | 530 |
| Unterzuteilung an die Wahlkreise (Wahlkreiswählerzahl Wahlkreis-Parteisitzzahl) | | | | | | | | | | Wahlkreisdivisor |
| **Wahlkreis** | 125 | 44 | 24 | 19 | 14 | 10 | 6 | 5 | 3 | |
| **Kreis 1-2** | 12 | 2377 4 | 1275 2 | 1819 3 | 1033 2 | 610 1 | 236 0 | 201 0 | 138 0 | 600 |
| **Kreis 3** | 16 | 2846 7 | 1379 3 | 653 1 | 1082 3 | 541 1 | 176 0 | 464 1 | 198 0 | 432 |
| **Kreis 4-5** | 13 | 2052 5 | 629 2 | 349 1 | 786 2 | 315 1 | 79 0 | 699 2 | 108 0 | 400 |
| **Kreis 6** | 10 | 2409 4 | 968 1 | 1092 2 | 842 1 | 440 1 | 342 1 | 230 0 | 111 0 | 660 |
| **Kreis 7-8** | 17 | 3632 5 | 1642 2 | 3015 5 | 1499 2 | 837 1 | 618 1 | 323 1 | 144 0 | 660 |
| **Kreis 9** | 16 | 2628 6 | 1972 4 | 754 2 | 572 1 | 708 1 | 615 1 | 154 0 | 333 1 | 473 |
| **Kreis 10** | 12 | 2938 4 | 1630 3 | 1272 2 | 807 1 | 696 1 | 391 1 | 212 0 | 124 0 | 650 |
| **Kreis 11** | 19 | 2976 6 | 2113 4 | 1039 2 | 661 1 | 777 2 | 631 2 | 191 1 | 328 1 | 470 |
| **Kreis 12** | 10 | 1322 3 | 1025 3 | 307 1 | 219 1 | 494 1 | 0 0 | 43 0 | 208 1 | 400 |
| **Parteidivisor** | | 1,01 | 1 | 1,01 | 1 | 1 | 0,88 | 0,8 | 1 | |

SP Sozialdemokratische Partei
SVP Schweizerische Volkspartei
FDP Freisinnig-Demokratische Partei
Grüne Grüne
CVP Christlichdemokratische Volkspartei
EVP Evangelische Volkspartei
AL Alternative Liste/PdA
SD Schweizer Demokraten

den. Eine faire Sitzzuteilung für das Gesamtproblem muss also auch aus der Sicht eines jeden Teilproblems – man betrachte etwa nur zwei Parteien und die für sie abgegebenen Stimmen und lasse alles andere außer Acht – fair erscheinen.

Ist die Oberzuteilung in Tabelle 1 kohärent? Widersteht sie dem neidvoll vorgetragenen Anspruch jeder Partei, dass ihr ein Sitz eher zustehe als einer anderen? Nehmen wir das Teilproblem, das aus den Parteien SP und AL besteht. Sie erhalten gemeinsam 44 + 5 = 49 Sitze bei zusammen 23 180 + 2517 = 25 697 Wählern. Das ergibt einen Idealanspruch von 49 · 23 180 / 25 697 = 44,20 Sitzen für die SP und von 4,80 Sitzen für die AL. Die gerundeten Idealansprüche von SP und AL ergeben 44 und 5 Sitze, und das ist genau das, was die beiden eh schon haben. Diese Paarung findet also keinen Anlass, zu streiten.

Schwachpunkt dieser Argumentation ist, dass sie auf die Parteien starrt. Wichtiger als die Parteien ist der demokratische Souverän, das Wahlvolk. Aber auch die Wählersicht kommt zum selben Ergebnis, wenn auch auf anderem Weg. Bei $x$ SP-Sitzen kommt jedem der 23 180 SP-Wähler der Erfolgsanteil $x/23\,180$ zu. Das heißt, jede SP-Wählerin und jeder SP-Wähler trägt einen Anteil von $x/23\,108$ zum Sitzerfolg der Partei ihrer Wahl bei. Die 2517 AL-Wähler erzielen den Erfolgswert $(49-x)/2517$. (Der Erfolgswert ist der Kehrwert des oben diskutierten »Preises« für einen Sitz. Das Ziel der gleichen Erfolgswerte aller Wählerstimmen ist der zentrale Ansatzpunkt in den Überlegungen der Verfassungsgerichte.)

Aus dem Grundsatz der Erfolgswertgleichheit folgt also die Gleichung

$$\frac{x}{23180} = \frac{49-x}{2517}$$

Die Lösung ist $x = 44{,}20$ und somit dieselbe, die der parteienorientierte Ansatz liefert. Beim Vergleich von SP und AL werden also deren Wähler wie auch die beiden Parteien selbst gerecht bedient. Die Überprüfung sämtlicher 28 Parteienpaare liefert dasselbe Ergebnis, wie mathematisch beweisbar ist:

*Es gibt genau ein Zuteilungsverfahren, für das bei allen denkbaren paarweisen Vergleichen kein Beteiligter einen rechnerischen Anlass findet, einem anderen einen Sitz wegzunehmen. Dieses Verfahren teilt von zwei Parteien beiden so viele Sitze zu, wie der zur nächsten ganzen Zahl gerundete Idealanspruch ausmacht, wenn die gemeinsamen Sitze neu aufgeteilt würden.*

Dieses konfliktminimierende, kohärente Verfahren ist die beschriebene Divisormethode mit Standardrundung (nach Webster, Sainte-Laguë und Schepers). Dagegen würde die Divisormethode mit Abrundung (nach Jefferson, D'Hondt und Hagenbach-Bischoff) im Beispiel der SP 45 und der AL 4 Sitze zuteilen und damit über Kreuz mit den Idealansprüchen geraten.

Eine Übersicht über die historischen Autoritäten, von denen die Zuteilungsmethoden ihre Namen haben, bietet die von Friedrich Pukelsheim zusammengetragene Ahnengalerie in Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 83.

| | SP Idealanspruch | | SVP Idealanspruch | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Kreis 11** | 2976 6 | $x = 5{,}71$ | 2113 4 | $10-x = 4{,}29$ | 10 |
| **Kreis 12** | 1322 3 | $9-x = 3{,}29$ | 1025 3 | $x-3 = 2{,}71$ | 6 |
| **Summe** | 9 | | 7 | | 16 |

**Die Kohärenzprüfung dieser Viererkette ergibt als Lösung der im Text genannten Bestimmungsgleichung $x = 5{,}71$. Die resultierenden Idealansprüche reproduzieren die schon vorliegenden Sitzzahlen. Das gilt beim Neuen Zürcher Zuteilungsverfahren für jede beliebige Transferkette.**

## Berner Doppelquotient

Damit ist zunächst die Oberzuteilung über jede Anfechtung erhaben. Was aber ist mit den oben angesprochenen Merkwürdigkeiten der Unterzuteilung?

Die erste Antwort ist: Einfach in einem Wahlkreis einen Sitz von einer Partei zu einer anderen zu schieben ist verboten; dadurch würden ja die fest vorgegebenen Parteisitzzahlen verändert. Es wäre allenfalls eine Art Ringtausch denkbar, eine so genannte Viererkette, zum Beispiel: Die SP gibt einen Sitz im Kreis 11 an die SVP ab und bekommt dafür in Kreis 12 von ihr einen Sitz zurück. Es ändern sich vier Zahlen in der Tabelle, und alle Wahlkreisgrößen und Parteisitzzahlen bleiben unverändert.

Die Frage muss also lauten: Harmonieren die zugeteilten Sitze mit den Wählerzahlen 2976, 1322, 2113 und 1025, oder ist das Zuteilungsergebnis angreifbar? Für dieses Teilproblem sind die Sitzzahlen jeder Partei in beiden Wahlkreisen zusammen (9 für die SP und 7 für die SVP) ebenso vorgegeben wie die Sitzzahlen jedes Wahlkreises für beide Parteien zusammen (10 in Wahlkreis 11 und 6 in Wahlkreis 12). Erhält nun die SP ideale $x$ Sitze in Wahlkreis 11, dann bleiben ihr $9-x$ in Wahlkreis 12. Die SVP bekommt $10-x$ beziehungsweise $x-3$ Sitze. Das Prinzip der Erfolgswertgleichheit würde fordern, dass $x/2976 = (9-x)/1322 = (10-x)/2113 = (x-3)/1025$ gilt, und das ist sogar als Ideal unmöglich. Eine Lösung $x$, die das leistet, gibt es nicht.

Was wäre also ein geeignetes Hilfsmittel, um vier Erfolgswerte gegeneinander abzuwägen? Schauen wir abermals in die Schweiz. In das Wahlgesetz des Kantons Bern wurde 1980 der so genannte Doppelquotient eingeführt. Er wird mit anderen Zahlen definiert und anders verwendet als hier; trotz dieser Unterschiede weist das Konzept den Weg zum Ziel.

Die Idee ist folgende: Eine gewisse Ungleichheit hat das Teilproblem von der Lösung des Gesamtproblems geerbt, und zwar in Gestalt der fest vorgegebenen Randwerte. Für einen Sitz in Wahlkreis 11 sind – im Teilproblem – (2976 + 2113)/10 = 508,9 Stimmen erforderlich, für einen Sitz im Wahlkreis 12 nur (1322 + 1025)/6 = 391,2 Stimmen. Wohlgemerkt: Diese Ungleichheit beruht nicht auf Willkür, sondern wird im Interesse einer Gleichheit »auf höherer Ebene« in Kauf genommen. Wenn sie nun schon nicht zu vermeiden ist, soll sie wenigstens gleichmäßig auf die Parteien aufgeteilt werden. Das Verhältnis der Erfolgswerte soll für beide Parteien dasselbe sein:

$$\frac{\frac{x}{2976}}{\frac{9-x}{1322}} = \frac{\frac{10-x}{2113}}{\frac{x-3}{1025}}$$

Eine analoge Ungleichheit gilt für die Parteien: Im Teilproblem sind 477,6 Stimmen für einen SP-Sitz erforderlich, aber nur 448,3 Stimmen für einen SVP-Sitz. Da kann man verlangen, dass beide ▷

## Kohärenzprüfung beliebiger Transferketten

**Eine Transferkette** besteht aus zwei Wahlkreisen pro beteiligter Partei und zwei Parteien pro beteiligtem Wahlkreis; die Randsummen gelten als fest. Die in der Tabelle unten angezeigte Sechser-Kette führt zu der Bestimmungsgleichung

$$\frac{x}{2846}\cdot\frac{x-5}{1499}\cdot\frac{x-5}{631}=\frac{12-x}{3632}\cdot\frac{8-x}{661}\cdot\frac{7-x}{176}$$

mit der Lösung $x=6{,}63$ und den angegebenen Idealansprüchen. Im Beispiel gibt es eine gegenläufige Sitzvergabe in Wahlkreis 11 (2 Sitze auf 631 Wähler, aber nur 1 auf 661) und eine innerhalb der SP (7 Sitze auf 2846 Wähler, aber nur 5 auf 3632). Die Idealansprüche belegen, dass bei Wahrung der Randsummen mehr Ausgewogenheit nicht erreichbar ist.

| | SP Idealanspruch | Grüne Idealanspruch | EVP Idealanspruch | |
|---|---|---|---|---|
| **Kreis 3** | 2846 **7** $x=$ **6,63** | | 176 **0** $7-x=$ **0,37** | **7** |
| **Kreis 7-8** | 3632 **5** $12-x=$ **5,37** | 1499 **2** $x-5=$ **1,63** | | **7** |
| **Kreis 11** | | 661 **1** $8-x=$ **1,37** | 631 **2** $x-5=$ **1,63** | **3** |
| **Summe** | **12** | **3** | **2** | **17** |

▷ Wahlkreise unter dieser Ungleichheit im gleichen Maß zu leiden haben:

$$\frac{\frac{x}{2976}}{\frac{10-x}{2113}}=\frac{\frac{9-x}{1322}}{\frac{x-3}{1025}}$$

Macht man diese Gleichungen etwas übersichtlicher, indem man die Nenner hochmultipliziert, so stellen sie sich als identisch heraus:

$$\frac{x}{2976}\cdot\frac{10-x}{2113}=\frac{9-x}{1322}\cdot\frac{x-3}{1025}$$

Das ist eine quadratische Gleichung, von deren beiden Lösungen nur $x=5{,}71$ sinnvoll ist. Damit sind sämtliche Idealansprüche in der diskutierten Viererkette bestimmt. Sie rechtfertigen die Sitzzahlen aus der Tabelle S. 78.

Viererketten sind nur die einfachste Möglichkeit, die Sitzverteilung anzufechten. An einem Ringtausch könnten auch mehr als zwei Parteien und entsprechend viele Wahlkreise beteiligt sein. Zu dem entsprechenden Teilproblem tragen jeder beteiligte Wahlkreis und jede beteiligte Partei genau zwei Wählerzahlen bei. Es gibt Vierer-, Sechser-, Achter- und allgemein $2n$-Ketten. Aus den $2n$ Erfolgswerten entlang einer Kette ergibt sich die Bestimmungsgleichung für die zugehörigen Idealansprüche. Die Tabelle im Kasten oben zeigt eine interessante Sechserkette. Die zugehörige Bestimmungsgleichung folgt der Produktgestalt der Viergleichung.

In allen Transferketten rechtfertigen die gerundeten Idealansprüche genau die Zahlen, die zur Prüfung vorliegen:

*Es gibt genau ein Zuteilungsverfahren der Sitze auf die Wahlkreise und Parteien, für das bei allen denkbaren Transferketten kein Beteiligter einen rechnerischen Anlass findet, einem anderen einen Sitz wegzunehmen. Dieses Verfahren teilt in jeder Transferkette pro Wahlkreis und Partei so viele Sitze zu, wie der zur nächsten ganzen Zahl gerundete Idealanspruch ausmacht, wenn die Sitze unter Wahrung der Wahlkreis- und Parteierfolge neu aufgeteilt würden.*

Die eindeutig bestimmte in diesem Sinn kohärente Methode ist das Neue Zürcher Zuteilungsverfahren. Ihre Sitzzuteilungen erweisen sich also deshalb als so stabil, weil jeder denkbare Sitztransfer unweigerlich von den Idealansprüchen wegführt.

Wir haben unser Verfahren mit dem Argument gerechtfertigt, dass es den Idealansprüchen entlang der beschriebenen Transferketten am nächsten kommt. Das ist zunächst nur eines von vielen denkbaren Argumenten. Es hat allerdings den unschätzbaren Vorteil, dass es der Erfolgswertgleichheit der Wählerstimmen eine zentrale Rolle zuweist. Damit passt es präzise in das Argumentationsmuster der (deutschen wie Schweizer) Verfassungsgerichte.

Es ist nicht auszuschließen, dass die Parteien ihre Ansprüche lieber anders definiert sehen würden; nur ist bislang keine überzeugende Alternative zu sehen.

Wirklich stabil ist das Neue Zürcher Zuteilungsverfahren deshalb wohl nicht wegen seiner mathematischen Eigenschaften, sondern weil es das vormathematische, von einem politischen Grundkonsens in Parlament und Regierung getragene Ziel eines Doppelmaßes an Proportionalität realisiert. ◁

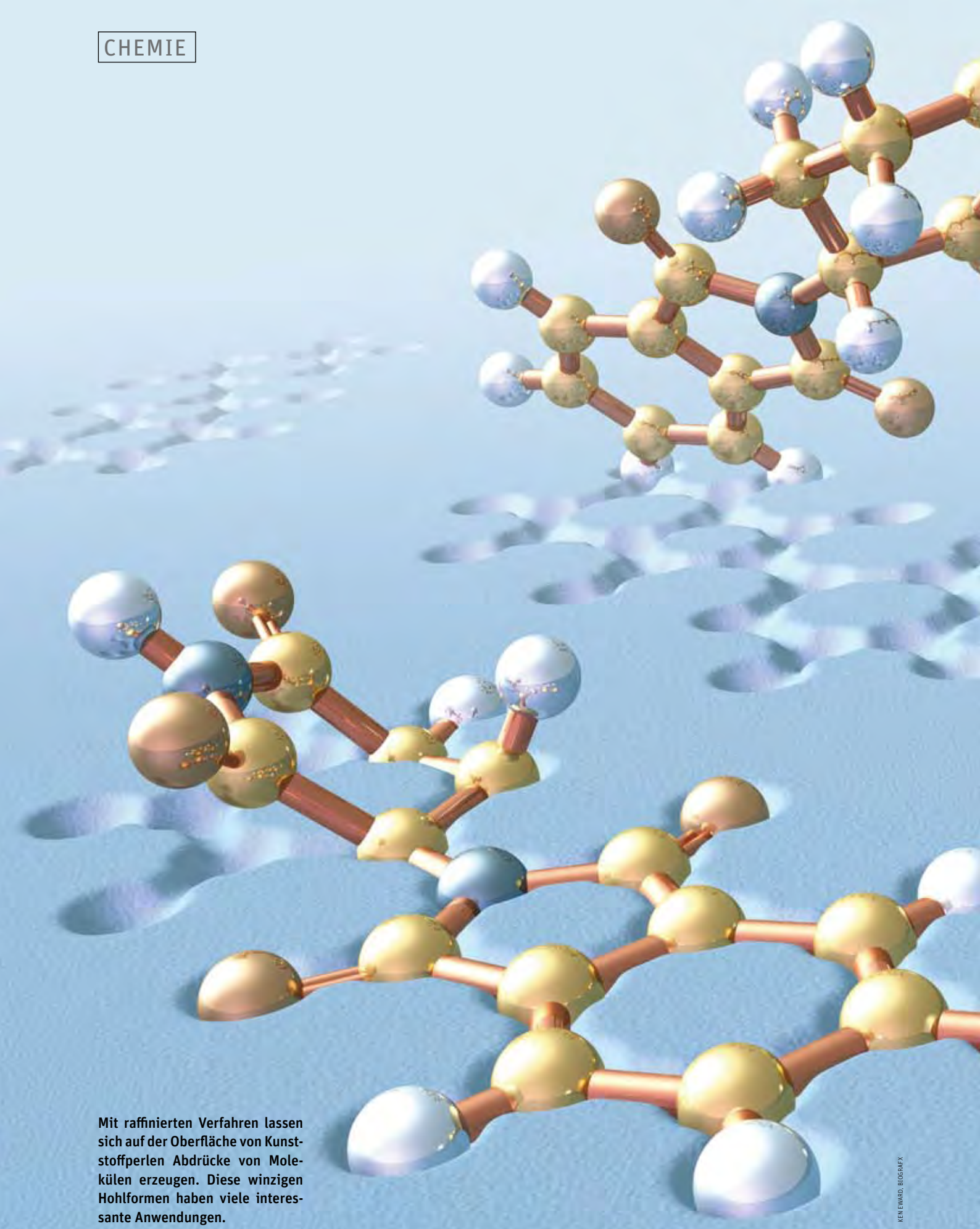
RIDA LARAKI

**Michel Balinski** (links) ist Professor im Institut für Ökonometrie an der École Polytechnique in Paris. **Friedrich Pukelsheim** ist Professor für Mathematik an der Universität Augsburg. Über der Wandtafel die Väter der französischen Mathematik (und Schöpfer früher Theorien der Gerechtigkeit), von links nach rechts: Joseph-Louis Lagrange, Gaspard Monge, Augustin Louis Cauchy, Siméon-Denis Poisson und Pierre-Simon Laplace.

AUTOREN UND LITERATUR

Mathematics and democracy. Recent advances in voting systems and collective choice. Von Friedrich Pukelsheim und Bruno Simeone (Hg.). Springer, Berlin 2006

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/866417.



**Mit raffinierten Verfahren lassen sich auf der Oberfläche von Kunststoffperlen Abdrücke von Molekülen erzeugen. Diese winzigen Hohlformen haben viele interessante Anwendungen.**

KEN EWARD, BIOGRAFX

# Prägen und Gießen von Molekülen

**Abdrücke und Imitate von Biomolekülen aus Plastik könnten nicht nur vor Bioterror-Angriffen warnen und giftige Substanzen aus der Umwelt entfernen, sondern auch die Entwicklung neuer Medikamente beschleunigen.**

Von Klaus Mosbach

Vor mehr als drei Jahrzehnten entwickelten meine Mitarbeiter und ich an der Universität Lund (Schweden) eine Art Fischernetz für den Nanobereich. Damit konnten wir lebende Zellen und später sogar noch kleinere biologische Einheiten wie Enzyme »fangen«. Unter geeigneten Bedingungen erfüllten diese dann auch außerhalb ihrer natürlichen Umgebung noch monatelang ihre normale Aufgabe.

Unsere Netze haben vielerlei praktische Anwendungen gefunden. Heutzutage stellen darin eingeschlossene Coli-Bakterien zum Beispiel Asparaginsäure her – eine Aminosäure, die als Ausgangsprodukt für verschiedene Arzneimittel dient. In der Nahrungsmittelindustrie wandelt ein eingesperrtes Enzym Traubenzucker in die viel süßer schmeckende Fructose um. Mit einem anderen »Fang« können die Netze sogar Vorstufen der Kunststoffe herstellen, aus denen sie selbst bestehen. Zu unserer Freude tauchen immer neue potenzielle Anwendungen für unsere damalige Erfindung auf. So könnten in den Netzen gefangene Zellen andere ersetzen, die abgestorben oder nicht mehr funktionstüchtig sind. Das eröffnet interessante Perspektiven in der Medizin – etwa für die Diabetes-Behandlung.

## Vom Netz zum Abdruck

Unsere Netze waren freilich nur ein erster Versuch, Kunststoffe mit biologischen und anderen Molekülen zusammenzubringen. Inzwischen prüfen mehr als 500 Forscher weltweit Anwendungen einer zweiten Erfindung, an der ich ebenfalls maßgeblich beteiligt war: Plastikabdrücke von Biomolekülen. Meine Gruppe hat eine heute oft angewandte Herstellungsmethode auf biochemischer Grundlage entwickelt. Andere Forscher wie Günter Wulff an der Universität Düsseldorf und Kenneth J. Shea an der Universität von Kalifornien in Irvine stützen sich dagegen auf Verfahren aus der organischen Chemie.

Auch für Abdrücke von Molekülen gibt es eine Fülle von Anwendungen. In der Nahrungsmittelindustrie wäre es zum Beispiel möglich, Giftstoffe wie das Aflatoxin der Schimmelpilze damit zu entfernen. Im biomedizinischen Bereich ist das Verfahren ebenfalls auf großes Interesse gestoßen. Hier könnte es zur Reinigung und Trennung von Wirkstoffen dienen. Aber auch das Frühstadium der Arzneimittelentwicklung ließe sich damit beschleunigen, was die Kosten senken würde. Schließlich könnten Abdrücke von Molekülen die Basis neuer medizinischer Geräte und diagnostischer Hilfsmittel bilden.

Als wir in meinem Labor in Lund an Methoden zur Immobilisierung von Enzymen und Zellen arbeiteten, kam mir eine Idee. Wie wäre es, unser ursprüngliches »Fischfang«-Verfahren so abzuändern, dass sich das Netz wie eine zweite ▷

▷ Haut eng an die eingeschlossenen Moleküle schmiegt – allerdings nur auf einer Seite – und dann erstarrt? Anschließend könnten wir den Fang wieder ausspülen und behielten permanente Abdrücke davon als Hohlräume zurück. An der Idee fesselte mich vor allem die Aussicht, dass andere Moleküle mit ähnlicher Form in diese Hohlräume passen sollten. Somit wären die Abdrücke für vielerlei Zwecke zu gebrauchen – beispielsweise zur Isolierung bestimmter Substanzen aus einem Stoffgemisch; denn nur Moleküle mit der richtigen Form und den richtigen chemischen Gruppen würden in den Hohlräumen festgehalten.

## Mondschein-Forschung

Mehr als zwanzig Jahre lang arbeitete meine Forschungsgruppe mit Unterbrechungen immer wieder an der Umsetzung dieser Idee. Ich nannte unsere Untersuchungen damals scherzhaft »Mondschein-Forschung«, denn wir mussten die Machbarkeit des Konzepts ohne finanzielle Unterstützung auf eigene Kosten prüfen. Hintenherum hörte ich von potenziellen Geldgebern, dass sie die Sache für zu abwegig und wenig aussichtsreich hielten.

Doch mit der Zeit fanden wir heraus, wie sich Plastikabdrücke von Molekülen herstellen lassen, und allmählich begannen auch externe Gelder zu fließen. Es gelang uns, das Verfahren einfach zu gestalten. Dadurch dauerte es nur wenige Tage, um Perlen oder dünne Filme mit Hunderttausenden von Abdrücken herzustellen.

Zuerst mischt ein technischer Angestellter die interessierenden Moleküle – wir bezeichnen sie als Modelle oder Schablonen – mit ausgewählten Kunststoffbausteinen. Diese Einheiten, auch Monomere genannt, werden dann polymerisiert, also zu Ketten verknüpft, und bilden so eine Plastikhülle um jedes Modell. Dann löst man die Schablonen mit einem Lösungsmittel heraus. Zurück bleibt ein Material, dessen Kunststoffoberfläche mit Hohlräumen gespickt ist, in denen sich die Kontur und Ladungsverteilung der chemischen Gruppen im ursprünglichen Biomolekül erhalten hat.

Diese »Molekülabdruck-Polymere« oder kurz Mips (nach englisch *molecularly imprinted polymers*) haben zwei positive Eigenschaften, die ihren Einsatz begünstigen. Zum einen kosten sie nicht viel, weil sie in kurzer Zeit aus billigen Kunststoffbausteinen hergestellt werden können. Zum anderen bleiben sie selbst unter extremen Bedingungen sehr lange intakt. Einige Exemplare aus unserem Labor waren auch nach einem Jahr noch funktionstüchtig.

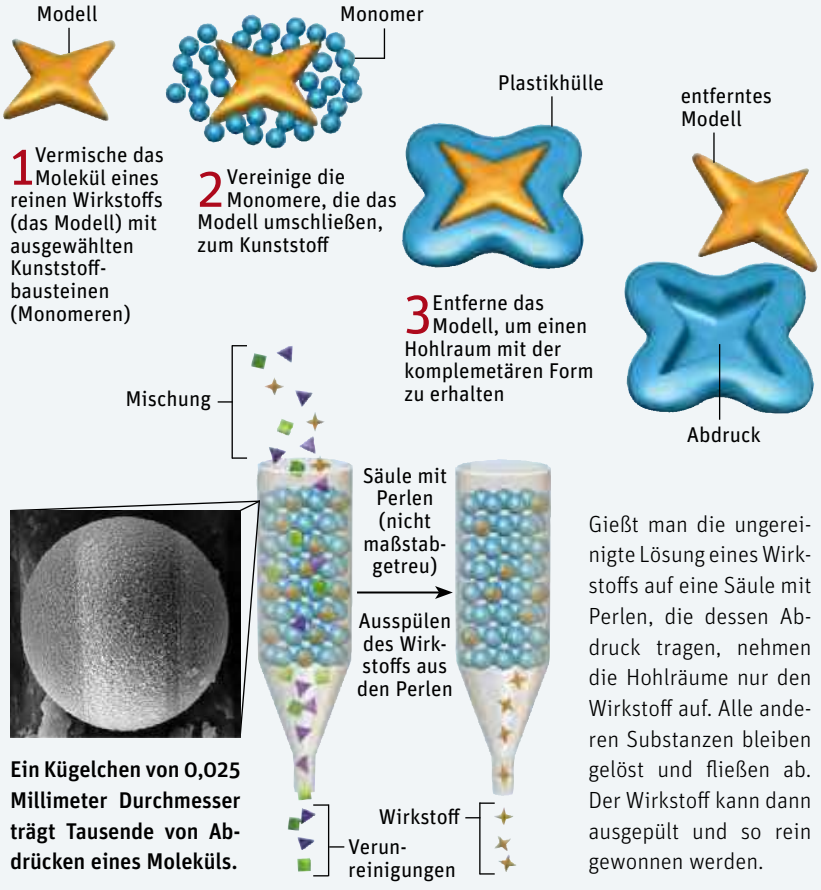
Die Anwendungsmöglichkeiten der Mips sind zahlreich. So lassen sich damit etwa unerwünschte Substanzen aus dem Blut entfernen. Dafür genügt ein Röhrchen mit Perlen, die Abdrücke der fraglichen Moleküle auf ihrer Oberfläche tragen. Eines oder mehrere davon könnten zu einer behelfsmäßigen Blutwäsche bei Patienten mit Nierenversagen dienen. Über einen Katheter würde das Blut aus einer Vene durch die außerhalb des Körpers angebrachten Röhrchen geleitet, wo sich die schädlichen Stoffe auf den Perlen mit den Abdrücken ansammeln, und dann gereinigt in den Kreislauf zurückgeführt. Patienten könnten die Vorrichtung, da sie nicht groß stört, dauernd tragen und müssten so vermutlich seltener zur Dialyse. Sobald die Mip-Einheit mit den unerwünschten Substanzen beladen wäre, würde sie einfach durch eine neue ersetzt.

Ebenso ließen sich aus anderen Organen wie dem Magen oder Darm mit Molekülabdrücken missliebige Stoffe entfernen. So ist es uns gelungen, auf diese Weise Cholesterin aus Lösungen zu extrahieren.

Die Selektivität der Mips könnte auch in der pharmazeutischen Industrie zur Reinigung von Arzneimitteln dienen. Große Bedeutung hat das vor allem bei Molekülen, die in zwei spiegelbildlichen Formen – so genannten Enantiomeren – vorkommen, von denen die eine therapeutisch wirksam, die andere dagegen potenziell schädlich ist. Einen tragischen Beleg dafür lieferte die Contergan-Affäre. Bevor man bemerkte, dass das Spiegelbild des Wirkstoffs die Em-

## Viel versprechende Hohlformen

**Kunststoffperlen mit Abdrücken von Molekülen** auf ihrer Oberfläche taugen für viele Zwecke – so zur Isolierung eines Wirkstoffs aus einem Substanzgemisch (unten). Ihre Synthese erfolgt im Wesentlichen in drei Schritten (oben).




**Ein Kügelchen von 0,025 Millimeter Durchmesser trägt Tausende von Abdrücken eines Moleküls.**

Gießt man die ungereinigte Lösung eines Wirkstoffs auf eine Säule mit Perlen, die dessen Abdruck tragen, nehmen die Hohlräume nur den Wirkstoff auf. Alle anderen Substanzen bleiben gelöst und fließen ab. Der Wirkstoff kann dann ausgepült und so rein gewonnen werden.

INFOGRAFIK: GEORGE RETSECK; FOTO: KLAUS MOSBACH UND ANDREW MAYES

## In Kürze

▶ Kunststoffe mit **Abdrücken von speziellen Molekülen** halten nur diese selektiv fest. Daher können solche Mips (von englisch *molecularly imprinted polymers*) dazu dienen, unerwünschte Substanzen aus Stoffgemischen zu entfernen oder erwünschte daraus zu isolieren.

▶ Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist der **Nachweis von Krankheitserregern oder Toxinen** in Umwelt- oder Blutproben.

▶ Junge Unternehmen arbeiten an der kommerziellen Verwertung dieses Verfahrens.

▶ Auch fortgeschrittene Varianten wie der doppelte Abdruck oder die **Direktformung von Molekülen** werden bereits erprobt.

bryonalentwicklung beeinträchtigt, war in den 1950er und frühen 1960er Jahren in vielen Ländern ein Gemisch aus beiden an schwangere Frauen verschrieben worden. So kamen etwa 10000 missgebildete Säuglinge zur Welt.

Herkömmliche chemische Synthesemethoden liefern die beiden spiegelbildlichen Formen zu gleichen Teilen. Arzneimittelhersteller setzen zwar heute meist raffinierte Herstellungsverfahren ein, um nur das eine Enantiomer zu erhalten. Trotzdem bildet sich oft auch das andere in kleinen Mengen. Im Vergleich zu typischen kommerziellen Trennverfahren sollte sich mit der Mip-Methode die unerwünschte Form leichter entdecken und entfernen lassen, denn nur sie würde in den jeweiligen Hohlraum passen.

### Einsatz gegen Bioterroristen und Umweltsünder

Angesichts ihrer hohen Selektivität wären Mips auch für Firmen und Behörden, die sich mit der Abwehr von Terrorismus und neu auftauchenden Krankheiten befassen, ein probates Mittel zum Erschnüffeln von Giften und Krankheitserregern. Für diesen Zweck kann man zwar heute schon Sensoren mit speziellen Biomolekülen ausstatten. Solche Sonden sind für den Einsatz außerhalb der Labors aber oft nicht stabil genug.

In Tests ließ sich mit Mips unter anderem das Herbizid Atrazin aufspüren. Desgleichen gelang der Nachweis von Sarin, einem Nervengas, das sich als Bioterror-Waffe eignet. Traurige Berühmtheit erlangte es, als Anhänger der Aum-Sekte Mitte der 1990er Jahre in Japan damit einen Anschlag in der U-Bahn verübten, dem 19 Menschen zum Opfer fielen. Auch Anthrax-Sporen, wie sie im Herbst 2001 an US-Regierungs- und Medienvertreter verschickt wurden, sollten sich mit Molekülabdrücken entdecken lassen.

Dabei können Sensoren mit mehreren Mips sogar verschiedene Verbindungen in einer Probe gleichzeitig identifizieren. Solch eine multifunktionale Sonde ließe sich auf einem Chip anbringen, der ein Signal an einen Empfänger senden würde, wenn eine der inkriminierten Substanzen auftaucht. Zum Entfernen der unerwünschten Stoffe könnten dann gesonderte Behälter mit einer großen Anzahl der jeweiligen Mips dienen. Behörden und Industrie haben Interesse an solchen Produkten bekundet, da sich damit Seen, Bäche und Böden von Umweltgiften befreien ließen.

Viele Anwendungen von Mips beruhen auf ihrer Fähigkeit, zu bestimmten Modellen passende Moleküle und Mikroorganismen einzufangen. Das Herstellungsverfahren bietet jedoch auch die Möglichkeit, einen Kunststoff derart zu formen, dass er ein natürlich vorkommendes Molekül – etwa einen Antikörper – teilweise oder ganz imitiert. Unser Immunsystem produziert solche Abwehrstoffe, sobald es spezifische Komponenten – so genannte Antigene – eines Eindringlings, sei es ein Virus oder Bakterium, bemerkt hat.

Antikörper-Moleküle erkennen sehr spezifisch jeweils nur ein bestimmtes Molekül, an das sie sich fest binden, und ignorieren alle anderen; in gewisser Weise ähneln sie somit einem Schlüssel, der ausschließlich in ein bestimmtes Schloss passt. Aus diesem Grund nutzen Entwickler sie schon seit Langem für Diagnosetests. Versetzt man zum Beispiel eine Blutprobe mit Antikörpern gegen ein bestimmtes Bakterium, so binden ▷



WISSEN SIE, WAS HEUTE WICHTIG IST?

Die Redaktion von spektrumdirekt informiert Sie schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/heute

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

▷ sie sich an den Krankheitskeim, falls er vorhanden ist, und zeigen damit die Infektion an. Auf ähnliche Weise lässt sich die Konzentration verschiedener Proteine im Blut bestimmen.

Um die benötigten Mengen an Antikörpern zu gewinnen, injizieren die Hersteller von Diagnosetests üblicherweise die betreffenden Antigene – zum Beispiel Proteine – in Ziegen oder andere Tiere. Diese bilden im Verlauf von ein bis zwei Wochen die gewünschten Abwehrstoffe, die dann aus ihrem Blut extrahiert werden. Mit unserem Verfahren lassen sich dagegen auf unblutige Weise künstliche Imitate von Antikörpern – wir nennen sie Plastikörper – herstellen, die noch dazu viel robuster und dauerhafter sind. Dazu muss man nur Abdrücke des betreffenden Antigens auf Kunststoffoberflächen erzeugen.

Die resultierenden Mips haben im Wesentlichen dieselbe Bindungsstelle wie die betreffenden natürlichen Antikörper und könnten diese in vielen Tests ersetzen. Dadurch müssten weniger Tiere leiden. Übrigens war die Entwicklung von Plastikörpern, für die ich den Nordischen Preis für Alternativen zu Tierversuchen erhielt, der einzige Teil meiner wissenschaftlichen Arbeit, den eine meiner Töchter als Teenager völlig verstand und guthieß.

## Enzyme aus Plastik

Mips bieten sich auch als länger haltbarer Ersatz für Enzyme an, welche die chemische Industrie in zunehmendem Maß verwendet. In der Natur produziert jeder Organismus Tausende solcher Reaktionsbeschleuniger, von denen jeder eine bestimmte biochemische Umsetzung katalysiert – zum Beispiel die Spaltung eines Moleküls an einer bestimmten Stelle oder die Verschmelzung zweier Substanzen. Die Reaktion findet immer genau dann statt, wenn das Zielmolekül oder Substrat in eine Vertiefung oder Bindungstasche im Enzym einrastet, die als sein aktives Zentrum bezeichnet wird.

Zur Herstellung künstlicher Enzyme oder »Plastizyme«, wie wir sie analog zu den Plastikörpern nennen, erzeugen mein Team und andere Gruppen Plastikabdrücke von Substraten, die exakt wie in der Bindungstasche des echten Enzyms angeordnet sind. Die resultierenden Hohlräume ahmen dann die dreidimensionale Form des aktiven Zentrums nach. Durch die Auswahl der Monomere sorgen wir außerdem dafür, dass die Plastizyme über ähnliche chemische Gruppen verfügen wie ihre natürlichen Vorbilder.

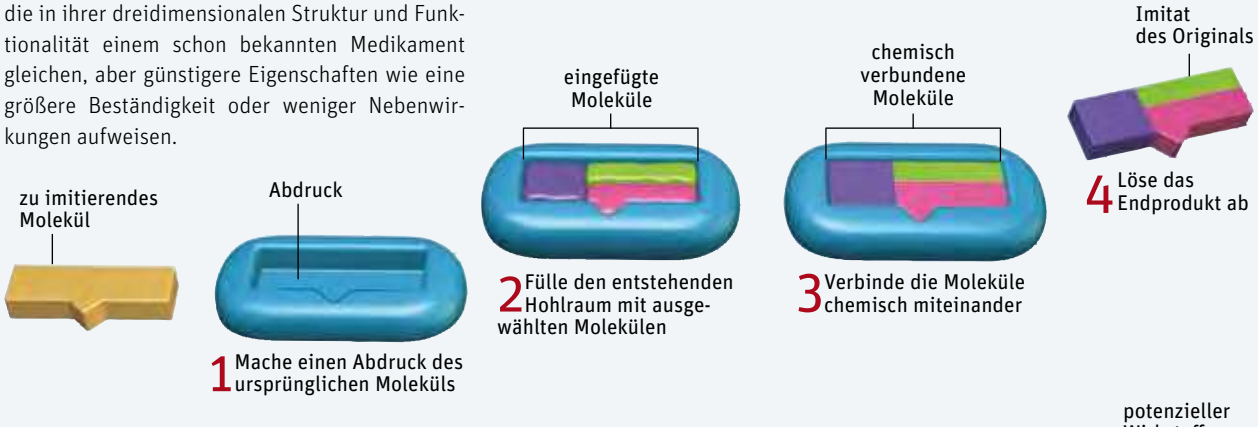
Bei unseren ersten Versuchen erzielten wir bereits eine gewisse katalytische Aktivität, aber wir müssen noch daran arbeiten, sie zu steigern. Plasti-

## Wie man aus Negativen Positive macht

**Bei zwei Erweiterungen des molekularen Prägens** dienen Hohlräume als »Gussformen« zur Herstellung von Verbindungen mit bestimmten räumlichen Eigenschaften. Beim Doppel-Abdruck-Verfahren besteht diese Gussform aus dem Plastikabdruck des zu imitierenden Moleküls, bei der Direktformung aus der Bindungstasche eines Biomoleküls.

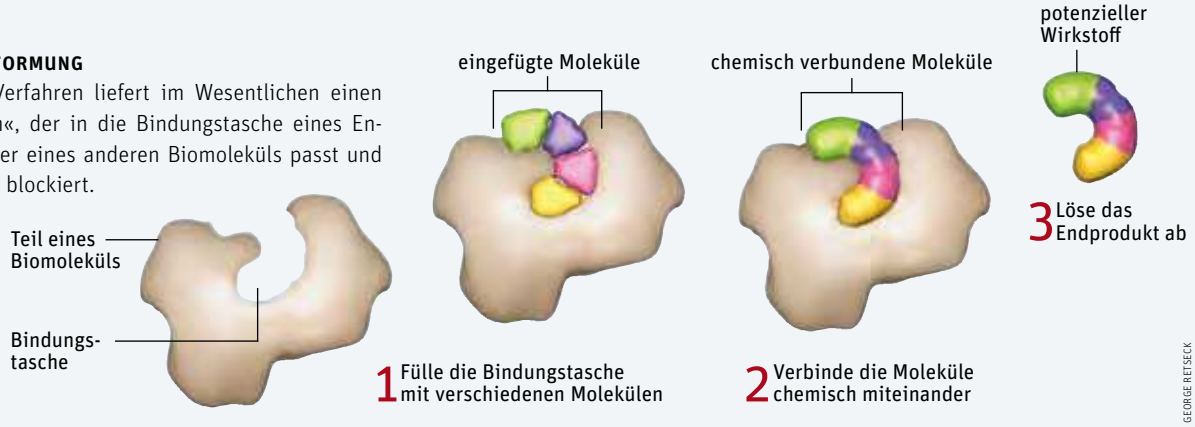
**Doppel-Abdruck-Verfahren**

Damit sollten sich Wirkstoffe herstellen lassen, die in ihrer dreidimensionalen Struktur und Funktionalität einem schon bekannten Medikament gleichen, aber günstigere Eigenschaften wie eine größere Beständigkeit oder weniger Nebenwirkungen aufweisen.




**Direktformung**

Dieses Verfahren liefert im Wesentlichen einen »Stopfen«, der in die Bindungstasche eines Enzyms oder eines anderen Biomoleküls passt und es damit blockiert.




GEORGE RETSECK

| Einige Firmen, die Mips nutzen | |
|---|---|
| **Aspira Biosystems** Burlingame (Kalifornien) | Erstellt von ausgewählten Proteinsegmenten Teilabdrucke für mögliche Anwendungen in medizinischer Forschung und Therapie |
| **Mip Technologies** Lund (Schweden) | Entwickelt Hilfsmittel zur Extraktion und Separation von Substanzen aus komplexen Mischungen im analytischen und industriellen Maßstab |
| **POLYIntell** Rouen (Frankreich) | Entwickelt Polymere für Reinigungszwecke und Sensoren. Erzeugt auf Anforderung künstliche Antikörper und Enzyme für die Pharmaindustrie und andere Branchen |
| **Semorex** North Brunswick (New Jersey), Ness Ziona (Israel) | Entwickelt Handgeräte für Ärzte zur Diagnose von ansteckenden Krankheiten und Krebs im Frühstadium, außerdem für den Militär-, Sicherheits- und Notfallbereich zur raschen Erkennung und Identifizierung von chemischen Kampfmitteln und Explosivstoffen |

zyme könnten natürlich auch Aufgaben übernehmen, für die bisher kein natürliches Enzym gefunden wurde.

Meine eigene sowie andere Forschungsgruppen verfolgen neuerdings auch zwei Ableger der Mip-Technologie. In einem Fall erhält man ein Imitat des ursprünglichen Moleküls. Genauer gesagt, entsteht eine Substanz mit derselben räumlichen Struktur und annähernd derselben Ladungsverteilung. Damit kann das Imitat auch dieselben Funktionen wie das Original ausüben.

Wir sprechen von einem Doppel-Abdruck; denn das Verfahren läuft darauf hinaus, vom Abdruck eines Moleküls quasi erneut einen Abdruck zu machen. Der erste Abdruck dient dabei als eine Art winzige Gussform. Dieses Nanogefäß füllen wir mit Molekülfragmenten oder Bausteinen von Kunststoffen und lassen sie zu einem einzigen Molekül mit der Form des Hohlraums verschmelzen.

Von diesem Verfahren könnten Pharmafirmen profitieren, die zu bekannten Wirkstoffen analoge Moleküle herstellen wollen – sei es, um die Wirksamkeit zu erhöhen, Nebenwirkungen zu vermeiden oder einen Patentschutz zu umgehen. Heute erstellt man dazu in der Regel eine so genannte kombinatorische Bibliothek, die aus Zehntausenden verwandter Verbindungen bestehen kann. Jede davon wird auf ihre Fähigkeit geprüft, sich an ein bestimmtes Biomolekül zu binden (das übrigens auch durch ein stabileres Mip ersetzt werden könnte). Die so selektierten Substanzen kommen dann in die nächste Testrunde.

Das Doppel-Abdruck-Verfahren ist viel zielgerichteter. Wir machen vom bekannten Wirkstoff einen Abdruck. In dieses Nanogefäß füllen wir Mischungen diverser Stoffe, die wir zum Imitat des Originals zusammenfügen. Dann prüfen wir, welche Kombinationen die erhofften Eigenschaften haben. Im Vergleich zum Screening umfangreicher kombinatorischer Bibliotheken sollte unser Verfahren sehr viel schneller geeignete Kandidaten für die nächste Testserie liefern.

An der zweiten Fortentwicklung, die wir Direktformung nennen, arbeiten ebenfalls einige Gruppen. Dabei dient ein biologisches Molekül selbst – oft ein Enzym oder sein aktives Zentrum – als Nanogefäß zur Herstellung eines Wirkstoffs. Auf diese Weise sollte sich insbesondere die Entwicklung von Enzym-Inhibitoren beschleunigen lassen. Rund ein Drittel der heutigen Medikamente fällt in diese Kategorie. Effizientere Verfahren zum Aufspüren weiterer solcher Stoffe wären daher ausgesprochen wertvoll.

Betrachten wir zum Beispiel die Metastasierung von Krebszellen. Ein Hemmstoff für ein – leider noch unbekanntes – Schlüsselenzym, das an diesem Prozess beteiligt ist, wäre zweifellos ein Segen für die Menschheit. Auf der Suche nach einem Molekül, welches das aktive Zentrum dieses imaginären Enzyms blockiert, könnte man blind alle möglichen Kandidaten durchmustern. Mehr Erfolg verspräche es dagegen, ähnlich wie beim Doppel-Abdruck-Verfahren Monomere und andere kleine Moleküle in das aktive Zentrum einzupassen und zu verknüpfen. Eine Kombination, die sich gut in die Bindungstasche einfügt, würde zumindest eine wichtige Voraussetzung für einen Inhibitor erfüllen und könnte dann weiter auf ihre Hemmwirkung in der lebenden Zelle getestet werden.

Wie bei allen neuen Technologien mit viel versprechenden Anwendungen gibt es natürlich noch gewisse Probleme zu lösen. Eines davon betrifft die Herstellung der Mips. Hier müssen wir noch herausfinden, wie sich die Menge der Abdrücke ohne Qualitätseinbuße steigern lässt. Das Problem ist sicherzustellen, dass ein Abdruck exakt dem anderen gleicht. Außerdem brauchen wir bessere Methoden zum Ausspülen der Schablonen.

Während wir Vertreter dieser jungen, aufstrebenden Forschungsrichtung uns bemühen, die verbliebenen Hürden auf dem Weg zu wirksameren Mips und verwandten Produkten zu beseitigen, gibt es ermutigende Anzeichen für ein wachsendes Interesse aus der pharmazeutischen und biotechnologischen Industrie. Mich erstaunt noch immer, wie man heute in wenigen Tagen Molekülformen herstellen kann, zu deren Entwicklung die Natur Millionen von Jahren benötigt hat, und ich freue mich schon auf die Zeit, wenn unsere Arbeit in der Arzneimittelentwicklung und auf vielen anderen Gebieten Früchte trägt. ◁

**Klaus Mosbach** ist emeritierter Professor an der Universität Lund (Schweden), wo er den Fachbereich Reine und Angewandte Biotechnologie sowie das Zentrum für Molekulare Prägung ins Leben gerufen hat. Er war auch Mitbegründer des Bereichs Biotechnologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH Zürich). Als ausgebildeter Pianist bezieht er seine Inspiration aus dem Musizieren.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Molecularly imprinted materials science and technology. Von M. Yan und O. Ramström (Hg.). CRC Press, 2004

Two ways to shape new drugs. Von S. Borman in: Chemical and Engineering News, Bd. 81, Nr. 2, S. 40, 2003

Formation of a class of enzyme inhibitors (drugs) including a chiral compound, by using imprinted polymers or biomolecules as molecular-scale reaction vessels. Von Yihua Yu et al. in: Angewandte Chemie, Bd. 114, S. 4459, 2002

The emerging technique of molecular imprinting and its future impact on biotechnology. Von K. Mosbach und O. Ramström in: Bio/Technology, Bd. 14, S. 163, Februar 1996

Drug assay using antibody mimics made by molecular imprinting. Von George Vlatakis et al. in: Nature, Bd. 361, S. 645, 18. Februar 1993

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/866420

PROJEKT »SCHÜLER AN HOCHSCHULEN«

# Statt Unterricht in die Vorlesung

**Leistungsstarke Schülerinnen und Schüler studieren neben der Schule so erfolgreich, dass sie vor dem Eintritt in die Universität schon das Vordiplom ablegen können.**

Von Ulrich Halbritter

Für die Überreichung eines Vordiplomzeugnisses gibt es normalerweise keine Feierstunde. Aber diesmal bitten drei Fernsehsender, der Deutschlandfunk und mehrere Zeitungsredaktionen den Absolventen um Interviews; stern tv mit Günther Jauch als Moderator widmet dem Thema eine ganze Sendung. Sogar die Produzenten von »tv total« zeigen Interesse. Denn der 18-jährige Mikko Fischer ist – im Oktober 2005 – der Erste, dem es gelungen ist, sein Vordiplom in Mathematik vor Studienbeginn abzulegen. Damit hat das Projekt »Schüler an der Universität« seinen ersten spektakulären Erfolg eingefahren.

Ein Jahr später erhält Patrick Graf ebenfalls zum Studienbeginn sein Vordiplom aus der Hand des Prorektors, nachdem er jahrelang aus Neuss an die Kölner Universität angereist ist. Drei weitere Kölner Schülerstudenten sind dieses Jahr an der Reihe; einer von ihnen muss sich mit dem Zeugnis noch ein Jahr gedulden, weil er erst in der 12. Klasse ist.

Das Projekt begann ganz informell am Rande einer so genannten Sommerakademie für Schüler (Spektrum der Wissenschaft 2/2006, S. 78) im Juli 2000. Lothar Theodor Lemper, damals Geschäftsführer der Hochbegabtenstiftung der Kreissparkasse Köln, und der Mathematiker Tassilo Küpper, Prorektor der Universität Köln, suchten nach einem Weg, hochbegabte Jugendliche nicht nur in immer wieder neu zu organisierenden Einzelmaßnahmen, sondern dauerhaft und nachhaltig zu fördern. Küpper und ich kamen daraufhin auf die Idee, Schülerinnen und Schüler der Oberstufe schon vor dem Abitur Anfängervorlesungen in Mathematik hören zu lassen. Zum Wintersemester 2000/2001 brachten Kreissparkasse und Universität die Initiative als offizielles Projekt auf den Weg.

Physik, Chemie und Informatik schlossen sich an, rechtliche Bedenken wurden beiseitegeschoben. Rolf Theil, Chemielehrer und heute stellvertretender Schulleiter am Rheingymnasium in Köln, nahm die Idee begeistert auf und stellte den Kontakt zur Bezirksregierung her. Der dort zuständige Dezernent Heinz Wambach unterstützte das Projekt sofort, ebenso wie die entsprechenden Stellen im Wissenschafts- und im Schulministerium. Eine ungewöhnliche Konstellation: Politik, Wirtschaft, Wissenschaft, Schule und Verwaltung zogen an einem Strang, um den eigentlichen Leistungsträgern, den interessierten Schülerinnen und Schülern, zum Studium zu verhelfen.

## Der lange Marsch durch die Institutionen

Wie immer in Deutschland waren die wichtigsten Fragen rechtlicher Natur. Wenn die Schüler Klausuren mitschreiben würden, durften wir dann Leistungsnachweise ausstellen, und würden diese später anerkannt werden? Wichtiger noch: Waren die Schüler während ihres Universitätsbesuchs überhaupt versichert? Die erste Frage ließ sich schnell klären: Einen Schein, den die Kölner Universität ausstellt, muss zumindest sie selbst später auch anerkennen. Bei der zweiten Frage fand Rolf Theil den richtigen Ansatz: Die Universitätsveranstaltungen werden zum »Lernen am schulfremden Ort« erklärt, bleiben wie ein Theaterbesuch im Rahmen eines Deutschkurses formal Schulunterricht und stehen damit unter dem Schutz der Gemeindeunfallversicherung. Damit waren die schwierigsten Hürden genommen; eine kurzfristige Werbekampagne der Kreissparkasse Köln bei den Schülern der Köln-Bonner Region ergab 26 Teilnehmer im Wintersemester 2000/2001. Kuriose Randnotiz: Da die Kreissparkasse Köln ihren Geschäftsbereich im Kreis, aber nicht in der Stadt Köln hat, durfte ihre Hochbegabtenstiftung keine Briefe an die Schulen im Stadtgebiet verschicken; das übernahm vertretungsweise Rolf Theil.

Am Ende des Semesters hatten zwei Teilnehmer die zweit- und die drittbeste Physikklausur geschrieben, in Konkurrenz zu den regulären Erstsemestern. Eine Schülerin hatte gleich zwei Anfängervorlesungen, nämlich Analysis I und Physik I, belegt und beide Übungsscheine erworben. Zugleich hatten alle drei ihr Abitur – im Einserbereich – abgelegt. Damit war auch die spannendste Frage beantwortet: Wie würden die Teilnehmer den Unterrichtsausfall verkraften? Denn alle relevanten Anfängervorlesungen fanden vormittags statt.

Nach dem »lokalen« Durchbruch in Köln folgte die Ausweitung auf Landes- und Bundesebene. Tassilo Küpper, mittlerweile Rektor, stellte das Projekt nacheinander der nordrhein-westfälischen Landesrektorenkonferenz, der Hochschulrektorenkonferenz und der Kultusministerkonferenz vor und fand allenthalben Zustimmung. Inzwischen haben die zuständigen Gremien entsprechende Beschlüsse und Gesetze verabschiedet.

Wie sich inzwischen herausgestellt hat, ist die Grundidee nicht neu: In den

**Jonas Huckestein (rechtes Bild, links) nimmt am 3. Juli 2005 sein Zertifikat über die erfolgreiche Teilnahme am Schülerstudium aus der Hand des Kölner Rektors Axel Freimuth (rechts) entgegen (in der Bildmitte der Bielefelder Rektor Dieter Timmermann). Voraussichtlich wird er sein Studium im Herbst dieses Jahres mit dem Vordiplom beginnen. Sein Mit-Jungstudent Bodo Bützler (links) nimmt neben der Schule an zwei Programmen zugleich teil: Chemie an der Universität und Klavier an der Musikhochschule Köln.**

USA gibt es solche und ähnliche Projekte (»Advanced Placement«) schon seit mehr als 50 Jahren.

Überall wurde das Projekt mit großem Interesse aufgenommen: Dass Jugendliche mehr leisten wollten, als sie mussten, und das auf hohem Niveau, war endlich einmal eine positive Nachricht aus der Jugendszene. Aus vielen Teilen Deutschlands riefen Eltern oder die Jugendlichen selbst an, um nach ähnlichen Angeboten in ihrer Region zu fragen. Sogar nach Köln umziehen wollten einige, nur um parallel zur Schule die Universität besuchen zu dürfen.

## Manche Schulen mauern

Nach Auftritten auf Messen und einschlägigen Fachtagungen wurden auch die Stiftung der deutschen Wirtschaft (sdw) und die Deutsche Telekom Stiftung auf unser Projekt aufmerksam. Die sdw hat inzwischen mehrere »Schülerstudenten« direkt nach dem Abitur auf Grund ihrer universitären Leistungen als Stipendiaten aufgenommen, während dies sonst erst nach mehreren Hochschulsemestern möglich ist.

Die Deutsche Telekom Stiftung entschloss sich, nach Vorgesprächen mit ihrem Vorsitzenden, dem ehemaligen Bundesaußenminister Klaus Kinkel, zu einem massiven Engagement (das sich gemäß der Stiftungssatzung auf die Fächer Mathematik und Informatik sowie die naturwissenschaftlichen und technischen Disziplinen beschränkt). Sie sieht unsere Initiative als beispielhaftes Projekt zur Begabtenförderung und zur Erleichterung des Übergangs von der Schule zur Hochschule, und zwar Letzteres nicht nur für die Teilnehmer. Denn die Schülerstudenten als »Wanderer zwischen zwei Welten« berichten ihren Mitschülern von ihren Uni-Erlebnissen.

Mittlerweile betreiben mehr als die Hälfte der deutschen Universitäten (mehr als fünfzig) das Projekt unter unterschiedlichen Namen und mit unterschiedlichen Auswahlverfahren; ständig kommen weitere hinzu. An der TU Chemnitz hat das Projekt soeben die Gremien passiert. Zwar sind an den meisten Universitäten immer noch Mathematik und Informatik Eckpfeiler des Projekts, aber mittlerweile beteiligen sich auch viele andere Disziplinen, so an der Ruhr-Universität Bochum alle Fachbereiche bis auf einen.

Nach vorsichtigen Schätzungen gab es im vergangenen Wintersemester bundesweit etwa 700 Teilnehmer. Begabungsforscher schätzen, dass 3 bis 6 Prozent aller Jugendlichen über ein so hohes Potenzial verfügen, dass sie am Projekt teilnehmen könnten. Da Schülerstudenten keine »richtigen« Studenten sind, bezahlen sie keine Studiengebühren.

Die Mehrzahl der Hochschulen verlässt sich bei der Auswahl geeigneter Kandidaten auf das Urteil der Schule. Leider lassen manche Schulen ihre Schüler nie oder nur selten am Projekt teilnehmen. »Schüler gehören an die Schule, nicht an die Uni!« ist eine häufig geäußerte Begründung – die zumindest dann dem Recht auf individuelle Förderung widerspricht, wenn die Schule keine eigenen adäquaten Förderungsmaßnahmen anbietet.

Auf welche pädagogischen Prinzipien sich diese Meinung bei leistungsstarken Schülern stützt, bleibt unklar. Eine schlimmere Begründung für ihre Verweigerungshaltung liefern widerstrebende Lehrkräfte im privaten Gespräch: »Meine besten Schüler brauche ich im Unterricht, sonst komme ich gar nicht voran.« Eine pädagogische Bankrotterklärung in zweifacher Hinsicht: Würden die besten Schüler an der Universität gefördert, könnte der Unterricht in der dann homogeneren Klasse besser dem Niveau angepasst werden. Glücklicherweise scheint die Mehrheit der Lehrer das Projekt zu unterstützen.

Gleichwohl bleibt der verpasste Unterricht ein ernst zu nehmendes Hindernis. Am Kölner Mathematischen Institut finden die Anfängervorlesungen immer von 8 bis 10 Uhr statt; ihr Besuch kostet Schüler aus der Nähe zwei bis drei Schulstunden an zwei Wochentagen. Die zugehörigen Übungen finden nachmittags statt, sodass für sie in der Regel kein Unterricht ausfällt. Weiter entfernt wohnende Teilnehmer fehlen oft zwei Vormittage pro Woche in der Schule (wenn auch nur in der Vorlesungszeit). Extrem sind die Verhältnisse an der Universität Würz- ▷

wis
wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de

BEIDE FOTOS: MARCUS LAUFENBERG, KÖLN

▷ burg: Im Wintersemester 2005/2006 hatte jeder fünfte der über 50 Projektteilnehmer mehr als 100 Kilometer zurückzulegen. Die Schüler sind jedoch auf Grund ihrer Leistungsstärke meist in der Lage, die Unterrichtsinhalte so nachzuarbeiten, dass sich ihre Noten nicht verschlechtern. Die hohen Reisekosten werden häufig zumindest teilweise von der Deutschen Telekom Stiftung oder lokalen Sponsoren übernommen. Den Fächern Mathematik und Informatik geht es dabei besser als beispielsweise der Chemie: Ganztägige Praktika über Wochen lassen sich mit dem Schulbesuch nicht vereinbaren.

Bei Gesprächen über die Lösung solcher Konflikte bringen Schulen wie Hochschulen gerne die Idee auf, die jeweils andere Institution könne ja ihre Veranstaltungen auf den Nachmittag verlegen – weisen jedoch solche Ansinnen für sich selbst als absurd zurück.

Der Mädchenanteil beträgt im Schnitt 30 bis 40 Prozent, mit großen Unterschieden von Fach zu Fach. In Informatik liegt er im einstelligen Bereich. Hier sollten die Schulen ermunternd eingreifen.

Das Engagement der Jugendlichen, die an der Universität – endlich – ein angemessenes Betätigungsfeld gefunden haben, ist beeindruckend. Oft überrascht es sie am meisten, dass sie zum ersten Mal im Leben hart arbeiten müssen, um mithalten zu können. Immer wieder erreichen unsere Leute Spitzenplätze: Ein Achtklässler schrieb in Düsseldorf die beste Informatikklausur; eine Schülerin der Klasse 11 schnitt in Köln in Linearer Algebra I als Beste ab. Die Liste ließe sich fast beliebig verlängern.

Das Projekt war ursprünglich auf die Oberstufe beschränkt – bis der oben erwähnte Mikko Fischer, damals 14 Jahre alt und in der 10. Klasse, mich eindringlich um Aufnahme in das Projekt bat. Sein Erfolg schon im ersten Semester bewirkte, dass die Beschränkung auf die Oberstufe generell entfallen ist. Die Schulen wissen am besten, ob sie einem jüngeren Schüler die Teilnahme gestatten. So gab es in Köln bereits erfolgreiche Teilnehmer, die im Alter von 12 Jahren eingestiegen sind, die niedrigste vertretene Klassenstufe ist die 7. Natürlich sind das Ausnahmen unter den Ausnahmen, aber Begabung lässt sich nun einmal nicht in Schablonen pressen.

## Abbruch ist kein Misserfolg

Allerdings ist insbesondere bei jüngeren Schülern eine gute Mitarbeit von Eltern und Lehrern unabdingbar. Die Universität ist mit jeglicher Form von Kontrolle einzelner Schüler überfordert. In Köln und Bonn finanziert die Deutsche Telekom Stiftung Tutoren für spezielle Schülerübungen neben dem regulären Übungsbetrieb. Die helfen dann, nicht Verstandenes nachzuarbeiten oder Stoff nachzuholen, wenn ein Schüler wegen einer wichtigen Klassenarbeit eine Vorlesung versäumt.

Selbstverständlich gibt es auch Projektabbrecher. In Köln sind nach acht Wochen in der Regel nur noch zwei Drittel der Teilnehmer dabei, in Bochum wegen intensiverer Betreuung und Auslese immerhin noch 90 Prozent. Man sollte jedoch einen Projektabbruch nicht als Scheitern oder als Anzeichen für eine Fehleinschätzung auffassen. Wer bei dieser Art des Schnupperns feststellt, dass das gewählte Fach doch nicht seinen Neigungen entspricht, und hinterher etwas anderes studiert, hat sich immerhin ein Jahr Zeitverlust erspart – und den Universitäten eine Erhöhung der Abbrecherquote. Andere hätten es ohne Weiteres schaffen können, wurden aber durch Zeitmangel aus dem Projekt vertrieben wie jener Schüler, der neben Studium und Abiturvorbereitung auch noch Musik und Sport betreiben und den Führerschein machen wollte, aber hinterher auf Anhieb einen Studienplatz für Computer Science in Oxford bekam, oder der 16-Jährige, den seine Freundin vor die Alternative »die Uni oder ich« stellte.

Die größte Gruppe bilden jedoch die Erfolgreichen, die Leistungsnachweise erwerben und Gleichgesinnte gefunden haben, die sich auch für das gleiche Studienfach – selbst in ihrer Freizeit – begeistern; sie nehmen dankbar die Möglichkeit des Studiums an.

Mikko Fischer studiert zurzeit in Cambridge, und wenn ich mein letztes Gespräch mit ihm richtig deute, hat er nicht vor, sein Studium in Minimalzeit zu beenden – gut so! Nicht ein Examen in Rekordzeit, sondern Begabungs- und Bildungsförderung sind primäre Ziele des Projekts. Dass beides trotzdem zusammentreffen kann, hat Aaron Dessauer aus Münster bewiesen: Nach erfolgreichem Schülerstudium und Abitur konnte er nach zwei weiteren Semestern in den Fächern Philosophie, Soziologie und evangelischer Theologie sein Magisterzeugnis in den Händen halten und – als 19-Jähriger – nach Harvard aufbrechen. ◁

## Schüler studieren

**Das Projekt geniesst mittlerweile** den Segen nahezu aller zuständigen Verwaltungen. § 65, Absatz 6 des nordrhein-westfälischen Hochschulgesetzes lautet:

»Schülerinnen oder Schüler, die nach dem einvernehmlichen Urteil von Schule und Hochschule besondere Begabungen aufweisen, können im Einzelfall als Jungstudierende außerhalb der Einschreibungsordnung zu Lehrveranstaltungen und Prüfungen zugelassen werden. Ihre Studien- und Prüfungsleistungen werden auf Antrag bei einem späteren Studium angerechnet.«

Ähnliche Formulierungen finden sich mittlerweile in den Hochschulgesetzen vieler Bundesländer.

Die Deutsche Telekom Stiftung und die Universität zu Köln haben ein gemeinsames Projekt installiert, das die weitere Verbreitung des Modells an allen deutschen Hochschulen zum Ziel hat. In diesem Rahmen gibt der Autor Einführungsvorträge und weitere Unterstützung – für die Empfängerhochschule kostenfrei.

Dr. Ulrich Halbritter
Mathematisches Institut
der Universität zu Köln
Weyertal 86 – 90
50931 Köln
Telefon 0221 470-4344
halbritter@math.uni-koeln.de

**Ulrich Halbritter** ist promovierter Mathematiker und arbeitet an der Universität zu Köln. Wenn ihm seine Verwaltungstätigkeit Zeit lässt, beschäftigt er sich gerne mit Zahlentheorie.

Dieser Artikel ist eine erweiterte und aktualisierte Fassung des Beitrags »Begabte Schüler – junge Studenten. Das Projekt ›Schüler an Hochschulen‹«, der in den Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung (Band 13, Heft 4, 2005) erschienen ist.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/867519.

BRAD DECECCO

# Als Rechner noch geschoben wurden

Vor der Ära der Taschenrechner waren Rechenschieber bei Wissenschaftlern und Ingenieuren äußerst beliebt. Ihre »Intelligenz« und ihr praktischer Nutzen erstaunen noch heute.

Als Rechenschieber noch in Mode waren, schwor jeder Ingenieur auf seinen Schiebestab. Erst die Taschenrechner beendeten ihre Karriere.

Von Cliff Stoll

Vor zwei Generationen hatten Ingenieure ein Standard-Outfit: weißes Hemd, enge Krawatte und Rechenschieber samt Schutzhülle. Seitdem mutierten Hemd und Krawatte zum T-Shirt mit Software-Werbung, die Schutzhülle wich der Handytasche und Rechenschieber wurden durch Taschenrechner ersetzt.

Doch der Rechenschieber ist einen Rückblick wert. Holen Sie ihn doch mal aus der Schublade, in die er vor 30 Jahren gelegt wurde, oder basteln Sie sich einen eigenen (siehe Kasten auf S. 94). Sie werden rasch erkennen, warum er damals unverzichtbar war. Vor 1970 war der Rechenschieber ähnlich verbreitet wie Schreibmaschinen oder Vervielfältigungsmaschinen. Mit ein paar Handgriffen konnte jedermann multiplizieren, dividieren, Quadrat- und Kubikwurzeln ziehen. Mit wenig mehr Aufwand kann jeder etwas Geübte auch Inverse, Sinus, Cosinus oder Tangens ermittelten.

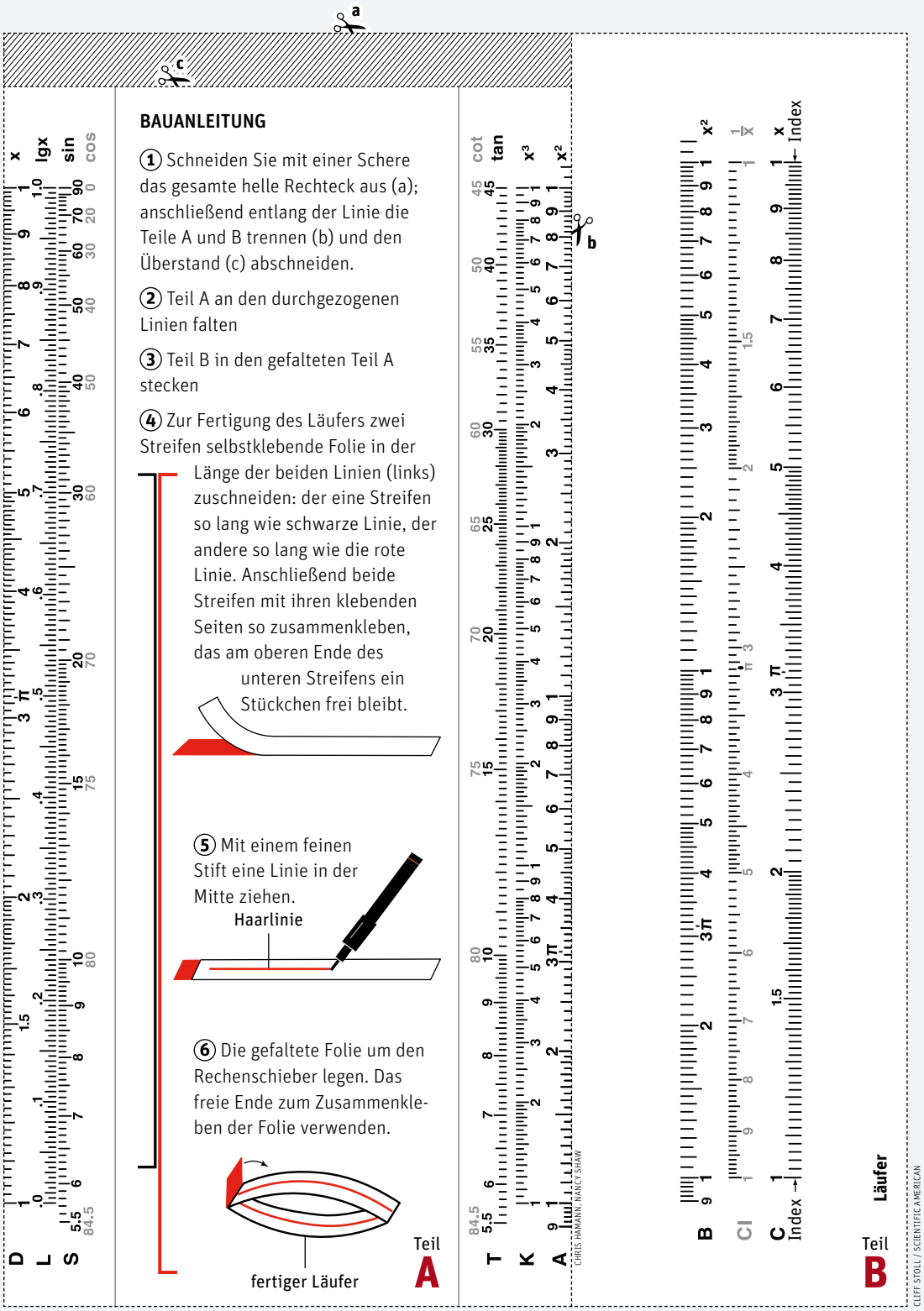
Mit seinen über ein Dutzend Skalen symbolisierte der kleine Helfer die Geheimnisse der Wissenschaft. Tatsache jedoch ist, dass für fast alle Aufgaben zwei Skalen bereits ausreichten, da sich viele technische Berechnungen auf Multiplikation und Division beschränken. Ein Pianist mag alle Tasten des Klaviers ausreizen, doch nur selten nutzten Ingenieure alle Skalen ihres Begleiters.

Einige Forscher besaßen – vielleicht weil sie befördert werden wollten – Rechenschieber aus feinem Mahagoni oder Buchsbaum; andere prunkten mit Geräten aus Elfenbein, Aluminium oder Fiberglas. Geizhälse indes – wie der Autor dieses Artikels – begnügten sich seinerzeit mit Plastikmodellen. Alle Typen – vom elegantesten bis zum einfachsten – basieren jedoch auf Logarithmen (siehe Kasten auf S. 96).

John Napier, ein schottischer Mathematiker, Physiker und Astronom, erfand

## Rechenschieber im Eigenbau

**Sie können sich aus Papier und selbstklebender Folie** selbst einen funktionsfähigen Rechenschieber bauen. Unsere Tests haben gezeigt, dass sich mit Fotokopien dieser Vorlagen auf dickerem Papier ein hinreichend stabiles Modell fertigen lässt. Diese Vorlagen finden sich auch im Internet auf der Seite www.spektrum.de.



▷ im Jahr 1614 die Logarithmen. Sein »Canon of Logarithms« beginnt so: »Da für Mathematiker und Rechenkundige nichts so beschwerlich ist wie Multiplikation, Division und das Ziehen von Quadrat- oder Kubikwurzeln aus großen Zahlen – es kostet nicht nur viel Zeit, sondern führt gerne auch zu Flüchtigkeitsfehlern –, überlegte ich mir, wie ich diese Hemmnisse auf zuverlässige und geschickte Weise umgehen könnte.«

Tatsächlich wurden Logarithmen – der Horror des Mathematikunterrichts in der Schule – erfunden, um unser Leben zu vereinfachen. In wenigen Generationen werden Leute vielleicht ähnlich schockiert reagieren, wenn sie hören, dass auch Computer einmal erfunden wurden, um unser Leben einfacher zu gestalten. Und wie funktionierten Napiers Logarithmen?

»Sie gestatten«, notierte der Erfinder, »die Zahlen, die multipliziert, dividiert oder aus denen Wurzeln gezogen werden sollen, einfach beiseitezulegen und sie durch andere Zahlen zu ersetzen, mit denen die Lösung viel einfacher gefunden werden kann – nämlich lediglich durch Addition, Subtraktion, Division durch zwei oder drei.«

## Kepler und der Mars

Somit lassen sich durch Logarithmen Multiplikationen auf Additionen reduzierten, Divisionen auf Subtraktionen, Quadratwurzelziehen auf Divisionen durch zwei, Kubikwurzelziehen auf Divisionen durch drei. Will man etwa 3,8 mit 6,61 multiplizieren, sucht man in einer Tafel Logarithmen dieser Zahlen – 0,58 und 0,82. Ihre Addition ergibt 1,4. Nun schaut man wieder in die Logarithmentafel und sucht die Zahl, deren Logarithmus 1,4 ist, und erhält als ziemlich genaue Näherung 25,12. Und schon ist es vorbei mit »Flüchtigkeitsfehlern«!

Napiers Erfindung revolutionierte die Rechenkunst: Mathematiker griffen die Idee sofort auf, um ihre Arbeit zu beschleunigen. So nutzte etwa Anfang des 17. Jahrhunderts der deutsche Astronom Johannes Kepler die neuartigen Logarithmen, um die Umlaufbahn des Mars zu berechnen. Ohne sie hätte er vielleicht nie seine drei Gesetze der Himmelsmechanik formulieren können. Henry Briggs, seinerzeit Englands be- ▷

## Bedienungsanleitung für Rechenschieber

**Zunächst wollen wir die Teile des einfachen Rechenschiebers benennen:** Das zweiteilige Instrument hat oben gewöhnlich die A-Skala. Die Skalen B und C befinden sich auf der beweglichen Zunge in der Mitte des Rechenschiebers. Die D-Skala steht auf dem unteren Teil. Der linke Index auf der Zunge ist die Ziffer 1 am linken Ende der C-Skala. Am rechten Ende der Zunge findet sich eine weitere 1: der rechte Index. Auf dem beweglichen Läufer sitzt die Strichmarkierung.

Zum Multiplizieren zweier Zahlen muss die Zunge so verschoben werden, dass ihr linker Index auf die erste der beiden Zahlen auf der D-Skala zeigt. Jetzt wird der Läufer verschoben, bis seine Strichmarkierung auf die zweite Zahl auf der C-Skala zeigt. Die Lösung findet sich unter der Strichmarkierung auf der D-Skala. Um beispielsweise 2 mit 4 zu multiplizieren, ist die C-Skala so weit zu verschieben, dass ihr linker Index über der 2 auf der D-Skala steht. Nun stellen Sie die Strichmarkierung des Läufers auf die 4 der C-Skala ein. Die Lösung, 8, findet sich auf der D-Skala – ebenfalls an der Position der Strichmarkierung.

**Wenn das Ergebnis so gross ist,** dass es außerhalb der Länge des Rechenschiebers läge, muss der rechte Index verwendet werden. Um beispielsweise 6 mit 7 zu multiplizieren, ist der rechte Index auf die 7 auf der D-Skala einzustellen, die Strichmarkierung auf die 6 auf der C-Skala. Als vorläufiges Ergebnis wird unter der Strichmarkierung auf der D-Skala 4,2 angezeigt. Nun muss das Dezimalkomma um eine Stelle nach rechts verschoben werden. Die korrekte Lösung lautet: 42.

Zur Division ist die Strichmarkierung des Läufers auf den Wert des Dividenden auf der D-Skala einzustellen. Danach wird die Zunge verschoben, bis der Teiler (Divisor) unter der Markierung liegt (an der gleichen Stelle wie der Dividend). Der gesuchte Quotient ist die Zahl unter dem Index. Zur Übung teilen wir 47 durch 33. Zunächst stellen Sie die Strichmarkierung auf 4,7 auf der D-Skala ein und verschieben die Zunge, bis der Wert 3,3 auf der C-Skala ebenfalls unter der Strichmarkierung liegt. Der rechte Index zeigt das Ergebnis an: 1,42. Wollen Sie auch das Quadrat einer Zahl berechnen? Dazu muss die Zunge nicht bewegt werden. Es genügt, die Strichmarkierung über eine Zahl auf der D-Skala zu schieben. In gleicher Position auf der A-Skala zeigt die Strichmarkierung das Quadrat dieser Zahl an. So findet sich direkt über der 7 auf der D-Skala der Wert 4,9 auf der A-Skala. Sie verschieben jetzt das Dezimalkomma eine Stelle nach rechts, und schon haben Sie die korrekte Lösung: 49.

Um Quadratwurzeln zu ziehen, muss die Zunge ebenfalls nicht bewegt werden. Aber dabei ist zu beachten, dass die A-Skala in zwei Hälften unterteilt ist. Die linke Hälfte geht von 1 bis 10, die rechte von 10 bis 100. Um die Quadratwurzel einer Zahl zwischen 1 und 10 zu ziehen, schiebt man die Läufermarkierung über die entsprechende Zahl auf der linken Hälfte der A-Skala, die rechte Hälfte ist für Zahlen zwischen 10 und 100.

Soll die Quadratwurzel einer Zahl zwischen 1 und 10 gefunden werden, muss der Läufer über diese Zahl auf der linken Hälfte der A-Skala geschoben werden, die Quadratwurzel der Zahl findet sich in gleicher Position auf der D-Skala. Mit der rechten Hälfte der A-Skala lassen sich Quadratwurzeln von Zahlen zwischen 10 und 100 bestimmen. Werden Zahlen in wissenschaftlicher Schreibweise mit Hilfe von Exponenten dargestellt (wie $1{,}23 \cdot 10^4$), finden sich solche mit geraden Exponenten auf der linken Seite der A-Skala, die mit ungeraden Exponenten (wie $1{,}23 \cdot 10^3$) auf der rechten.

**Es gibt auch viele Möglichkeiten, Rechnungen zu vereinfachen.** So kann die Läufermarkierung als »Kurzzeitgedächtnis« zum Zwischenspeichern von Lösungen umfangreicherer Kalkulationen verwendet werden. Oder man kann die CI-Skala benutzen, um zu verhindern, dass Ergebnisse jenseits des Rechenschieber-Endes liegen. Auf dem Rechenschieber zum Selbstbasteln (links) finden sich noch weitere Skalen. Die K-Skala dient der Berechnung von Kubikzahlen und Kubikwurzeln, die S- und die T-Skala stehen für Sinus und Tangens. Die L-Skala liefert den Logarithmus einer Zahl auf der D-Skala. Probieren Sie es selbst. Nach ein wenig Übung werden Sie erstaunt sein, wie einfach er zu handhaben ist – und wie nützlich er sein kann.

▷ deutendster Mathematiker, reiste eigens nach Schottland, um Napier aufzusuchen.

»Mein Herr«, soll Briggs zu dem Forscher gesagt haben, »ich habe diese lange Reise in der Absicht unternommen, zu erfahren, welcher Genius und welche Weisheit Sie als Ersten diese für Astronomen so überaus hilfreiche Idee finden ließ. Ich frage mich, warum niemand zuvor darauf kam, wo sie doch jetzt, da sie bekannt ist, so einfach erscheint.« Briggs hatte ein gutes Auge für Genies: Napier erfand später noch das Dezimalkomma, Rechenstäbe (bekannt als Napiers Knochen) und lieferte Grundlagen für Isaac Newtons Differenzialrechnung.

John Napier hatte zwar das Rechnen vereinfacht, doch dafür musste man eine Logarithmentafel zur Hand zu haben. So kam es, dass 1620 der Londoner Mathematiker Edmund Gunter ein Lineal mit Logarithmen markierte – wodurch seine rechnenden Kollegen Logarithmen ermitteln konnten, ohne erst lange in die Bibliothek zu gehen. Gunter zog eine Zahlenlinie, in der die Zahlen proportional zu ihren Logarithmen positioniert wurden. In dieser Skala liegen aufeinanderfolgende Zahlen am linken Ende deutlich weiter auseinander als am rechten, wo sie immer enger zusammenrücken. Zwei Zahlen konnten nun miteinander multipliziert werden, indem man mit einem Stechzirkel den Abstand vom Anfang der Skala bis zum ersten Faktor abtrug, die Zirkelspitze dann auf den zweiten Faktor setzte und an der Position des zweiten Schenkels das Ergebnis ablas.

Um 1622 legte William Oughtred, ein anglikanischer Geistlicher, zwei logarithmische Skalen nebeneinander und schuf so den ersten Rechenschieber. Einige Jahre später konstruierte er außerdem eine Rechenscheibe – einen kreisförmig ausgelegten Rechenschieber (siehe Bild rechts). Oughtred prahlte nicht mit seinen Errungenschaften. Er schätzte die reine Mathematik und glaubte wohl, seine Erfindungen hätten keinen besonderen Wert. Schließlich würden sich Mathematiker Gleichungen ausdenken, sie nutzen sie nicht. (Dies trifft auch heute noch zu: Geld verdient man oft damit, eine Anwendung für etwas zu finden, was jemand anders entwickelt hat.)

## Gut zu Fuß und zu Pferd

Aus welchem Grund auch immer – Oughtred versäumte es jedenfalls, seine Erfindung publik zu machen. Doch einer seiner Studenten, Richard Delamain, behauptete in einer 1630 veröffentlichten Druckschrift, dass ihm die Idee der Rechenscheibe gekommen sei. Delamain, eher Ingenieur als Mathematiker, freute sich besonders über die gute Mobilität der Scheibe – und schrieb, sie ließe sich »sowohl beim Reiten als auch zu Fuß« benutzen. Als ihm so sein Anrecht auf die Erfindung geraubt wurde, geriet

## Rechnen mit Logarithmen

**Fühlen Sie sich bei Logarithmen leicht benebelt?** Das ist kein Wunder: Wenn jeder Schüler einen Taschenrechner hat, brauchen Logarithmen nicht mehr so umfassend wie früher gelehrt zu werden. In der Gleichung $a^x = m$ ist x der Exponent.

Man kann x auch als »Logarithmus von m zur Basis a« bezeichnen. Dabei kann a jede beliebige Zahl sein. Wir wollen uns aber auf die gängige Logarithmen zur Basis 10 beschränken (bei denen also a = 10 ist). Der Logarithmus von 1000 ist dann 3, weil 10 potenziert mit 3, also $10^3$, 1000 ist. Umgekehrt ist der Antilogarithmus von 3 1000 – er ist das Ergebnis, das man erhält, wenn man 10 mit 3 potenziert.

**Exponenten müssen nicht ganzzahlig sein.** So ist beispielsweise auch $10^{0,25}$ erlaubt, was rund 1,778 ergibt; $10^{3,7}$ ergibt rund 5012. Der Logarithmus von 1,778 ist daher 0,25, und der von 5012 ist 3,7. Logarithmentafeln findet man in Online-Bibliotheken wie www.sosmath.com/tables/logtable/logtable.html.

Wenn Zahlen als Zehnerpotenzen dargestellt werden, lassen sie sich multiplizieren, indem man ihre Exponenten addiert. So liefert $10^{0,25}$ mal $10^{3,7}$ das Ergebnis $10^{3,95}$ ($10^{0,25 + 3,7}$). Und was ist $10^{3,95}$? Suchen Sie den Antilogarithmus zu 3,95 in der Tabelle, das Ergebnis ist 8912 – was in der Tat dem Produkt aus 1,778 und 5012 entspricht.

Auf die gleiche Weise, wie Multiplikation zur – einfacheren – Addition wird, wird Division zur Subtraktion. Hier ein Beispiel, wie sich 759 mit Hilfe von Logarithmen durch 12,3 teilen lässt: Zunächst müssen die Logarithmen zu 759 und 12,3 nachgeschlagen werden: Es sind 2,88 und 1,09. Zieht man 1,09 von 2,88 ab, so erhält man 1,79. Nun sucht man den Antilogarithmus zu 1,79 heraus – und erhält als Lösung 61,7. Wollen Sie die Quadratwurzel aus 567,8 berechnen? Zunächst müssen Sie dazu den Logarithmus suchen: 2,547. Teilen Sie diesen durch 2, und Sie erhalten 1,377. Schlagen Sie nun den Antilogarithmus zu 1,377 nach. Die Lösung ist 23,82.

Es gibt auch Komplikationen. In Logarithmentabellen findet sich nur die Mantisse – die Nachkommastellen des Logarithmus. Um den tatsächlichen Logarithmus zu finden, muss man eine (ganzzahlige) Zahl (die so genannte Kennziffer) zur Mantisse addieren. Die Kennziffer ist die Anzahl der Dezimalstellen, um die das Dezimalkomma der zugehörigen Zahl verschoben werden muss. Um etwa den Logarithmus von 8912 zu bestimmen, schlägt man die Logarithmentafeln auf und findet den Wert 0,95. Danach sucht man die Kennziffer zu 8912 heraus – es ist die 3 (weil das Dezimalkomma drei Stellen nach links verschoben werden muss, um von 8912 zu 8,912 zu kommen). Addiert man nun die Kennziffer zur Mantisse, erhält man den vollständigen Logarithmus: 3,95.

**Berechnungen mit Logarithmen stellen immer nur gute Näherungen dar,** da die Tabellen nicht vollkommen exakt sind. Logarithmen tauchen überall in der Wissenschaft auf. Chemiker nutzen sie, um den Säuregehalt mittels pH-Wert anzugeben (der pH-Wert ist der negative Logarithmus der Wasserstoffionen-Konzentration einer Lösung).

Schallintensität wird gemessen in Dezibel (dem zehnfachen Logarithmus der Intensität geteilt durch eine Standardintensität). Die Stärke von Erdbeben wird in Werten der Richterskala angegeben, die auf Logarithmen basiert – ebenso wie die scheinbaren Helligkeiten (angegeben in Klassen) von Sternen und Planeten.

Aber auch im täglichen Leben begegnen uns Logarithmen. Viele Diagramme, die große Zahlen darstellen, nutzen logarithmische Skalen, deren Werte in Zehnerpotenzen (10, 100, 1000 und so weiter) zunehmen – wie auf den Skalen der Rechenschieber.

Oughtred außer sich. Er veranlasste seine Freunde, Delamain als »schamlos« und »geistigen Taschendieb« zu beschimpfen. Der Streit setzte sich bis zu Delamains Tod fort. »Diese Schmach«, schrieb Oughtred einmal später, »brachte mir viele Nachteile.« Wer seine Erfindung in Händen hielt, brauchte keine Logarithmentafeln mehr. Er musste nicht einmal mehr wissen, was Logarithmen sind. Multiplikation erforderte nur noch, zwei Zahlen aneinanderzureihen und eine Skala abzulesen. Rechenschieber waren schnell und leicht zu transportieren.

Obwohl eine grandiose Idee, brauchte das Gerät dennoch zwei Jahrhunderte, um sich durchzusetzen. »Für ein paar Schillinge«, beklagte noch 1850 der französische Mathematiker Augustus de Morgan die geringe Verbreitung, »könnten viele Leute einige Hundert Mal so viel Rechenkraft in ihre Taschen stecken, als sie im Kopf haben.«

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde der Rechenschieber verbessert und erweitert. Peter Roget, der Erfinder des Thesaurus, beschrieb 1814 in einem Vortrag vor der Royal Society den von ihm erfundenen Log-Log-Rechenschieber. Damit konnte er sogar fraktionale Potenzen und Wurzeln berechnen – etwa 30,6 hoch 2,7. Der Nutzen des Log-Log-Rechenschiebers wurde jedoch erst nach 1900 erkannt, als Chemiker, Elektroingenieure und Physiker mit immer komplizierteren mathematischen Formeln konfrontiert wurden.

Es bedurfte eines 19-jährigen französischen Artillerieleutnants – Amédée Mannheim –, um den Rechenschieber weithin populär zu machen. 1850 wählte er die vier wichtigsten Skalen aus und fügte dem Rechenschieber einen verschiebbaren Läufer hinzu – eine Ablesehilfe, die auf beliebige Zahlen eingestellt werden konnte. Innerhalb weniger Jahre nahm sogar die französische Armee diese Geräte in ihre Bestände auf. Denn wenn die preußische Armee angriffe, wer hätte dann noch Zeit, mit einer Kanone auf den Feind zu zielen und gleichzeitig lange Kalkulationen durchzuführen?

**Den Rechenschieber erfand der anglikanische Geistliche William Oughtred im Jahr 1622. Henry Sutton konstruierte um 1633 ein kreisförmiges Modell und Robert Bissaker 1654 die erste Version, bei der ein Stab in einer festen Halterung gleiten konnte. Der Ingenieur Otis King aus London wickelte 1921 meterlange Skalen um einen Zylinderstab, der in die Tasche passte (unten).**

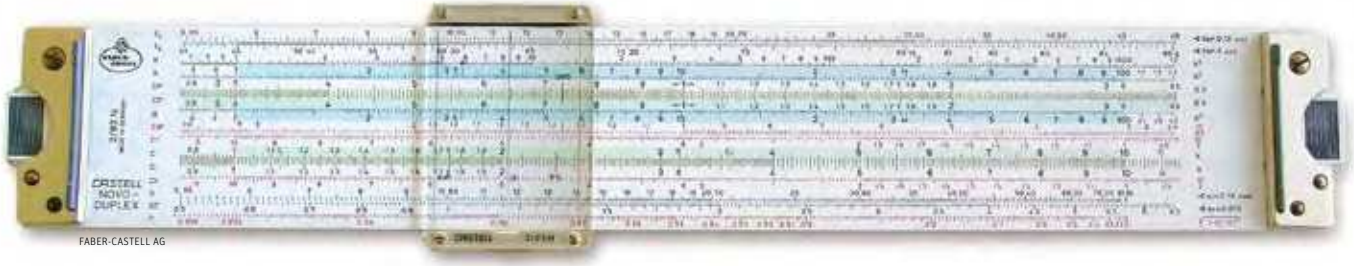
OBEN: SCIENCE AND SOCIETY PICTURE LIBRARY / SCIENCE MUSEUM; UNTEN: VINTAGECALCULATORS.COM

## Kreise, Scheiben und Spiralen

Mit der Zeit übernahmen Europas Ingenieure, Landvermesser, Chemiker und Astronomen Mannheims verbessertes Modell. Nach dem Ersten Weltkrieg setzten es auch amerikanische Wissenschaftler ein. Fast alle Rechenschieber – bis auf die ganz billigen – zeigten Quadratzahlen und Quadratwurzeln an, Kubikzahlen und Kubikwurzeln, inverse Zahlen, Sinus und Tangens. Die besten warteten sogar mit hyperbolischen Funktionen auf, mit denen sich etwa Vektoren und Kettenkurven berechnen ließen, beispielsweise für die Konstruktion von Hängebrücken. Um die Instrumente noch genauer zu machen, fügten die Hersteller Lupen hinzu, mit denen sich die Skalen detaillierter einstellen und ablesen ließen, unterteilten die Skalen noch feiner und verlängerten das Instrument. Zudem trugen sie Napiers Logarithmen auf kreis-, spiral-, scheiben- oder zylinderförmige Rechenhilfen auf. 1921 wickelte der Londoner Ingenieur Otis King eine gut 1,50 Meter lange logarithmische Skala sogar um einen Zylinder von rund 2,5 Zentimeter Durchmesser, der gut in die Tasche passte.

Ingenieure rühmten sich ihrer Berechnungen mit vierstelliger Genauigkeit. Für noch größere Präzision mussten sich Wissenschaftler einen so genannten Fuller-Kalkulator zulegen – damals die genaueste mechanische Rechenhilfe: Eine 12,50 Meter lange Spirale schlängelte sich um einen hölzernen, gut 30 Zentimeter langen Zylinder. Dank seiner speziellen Anzeige hatte der Fuller-Kalkulator die Präzision eines Rechenschie- ▷

**Einer der schönsten und beliebtesten Rechenschieber aller Zeiten: der Faber-Castell 2/83N**




FABER-CASTELL AG

IBM

**Als »Computer« wurden ursprünglich Menschen bezeichnet, die ihre Zeit mit Berechnungen von Zahlen verbrachten. Bis in die 1960er Jahre benutzten sie dazu meist Rechenschieber. Das änderte sich, als elektronische Taschenrechner und digitale Computer aufkamen.**

▷ bers von 25,3 Meter Länge, was fünfstellige Genauigkeit lieferte. Das Gerät konnte auch mit einem gravierten Nudelholz verwechselt werden.

Mangels Alternativen übernahmen auch die Ingenieure der Technikära den Rechenschieber. Hersteller versahen ihn mit zusätzlichen Markierungen, die das Rechnen beschleunigten. Auf den Skalen fanden sich nun auch die Konstanten Pi, Pi/4 und *e* (Basis des natürlichen Logarithmus), und zuweilen gab es Markierungen, um Inch in Zentimeter oder Pferdestärken in Watt umzurechnen. Zudem erschienen Modelle für Spezialisten: mit Molekulargewichten für Chemiker, mit Hydraulikformeln für Schiffbauer oder mit radioaktiven Zerfallskonstanten für Kerntechniker.

Um 1945 war bei Ingenieuren der Log-Log-Duplex-Rechenschieber weit verbreitet. Mit bis zu 12 Skalen auf jeder Seite versetzte er seine Besitzer in die Lage, eine Zahl mit einer beliebigen anderen zu potenzieren und trigonometrische Berechnungen mit Sinus-, Cosinus- und Hyperbel-Funktionen durchzuführen. Im Zweiten Weltkrieg nutzten amerikanische Bomberstaffeln und Navigatoren, die rasch Ergebnisse benötigten, spezielle Geräte. Die US-Marine entwickelte einen Standard-Rechenschieber mit Aluminiumkörper und Plastikläufer, in den Zelluloidkarten für spezielle Anwendungen eingesetzt werden konnten – bei Flugzeugen etwa für Reichweite, Kraftstoffverbrauch oder Flughöhe.

Noch bis in die 1960er Jahre konnte man keine Ingenieurausbildung abschließen, ohne auch einen einwöchigen Kurs im Gebrauch von Rechenschiebern absolviert zu haben. In jedem Fachbereich für Elektrotechnik hingen sie in Lederhüllen an den Arbeitsplätzen. In Seminaren konnte man sehen, wer die Zahlen des Referenten nachprüfte. Hightech-Firmen verschenkten sie mit eingravierten Markenzeichen an Kunden.

Vergegenwärtigen Sie sich einmal, welche technischen Meisterleistungen ihre Existenz der Tatsache verdanken, dass zwei Stäbe aneinander entlangglitten: das Empire State Building, der Hoover-Damm, die geschwungenen Kurven der Golden Gate Bridge, Automatikgetriebe von Autos, Transistorradios, die Boeing 707. Wernher von Braun, Erfinder der V2-Rakete sowie der Saturn V, verließ sich auf einen recht einfachen Rechenschieber der Marke Nestler. Die Firma Pickett stellte Modelle her, die sogar bei jeder Apollo-Mission zum Mond für den Notfall mitgeführt wurden. Der sowjetische Raumfahrtingenieur Sergej Korolew benutzte bei der Entwicklung der Sputnik- und Wostok-Raumsonden ein Nestler-Modell. Auch Albert Einstein bevorzugte diese Marke.

Doch Rechenschieber haben eine Achillesferse: Standardgeräte sind nur auf drei Ziffern genau. Das genügt vollauf, wenn es darum geht, wie viel Zement benötigt wird, um im Boden ein Loch zu füllen. Doch für die Berechnung der Flugbahn einer Raumsonde auf Mondkurs reicht es nicht. Und was noch schlimmer ist: Man muss die Dezimalkommastelle im Kopf behalten. Wenn der Läufer auf »346« steht, kann das 3,46, 3460 oder 0,00346 bedeuten.

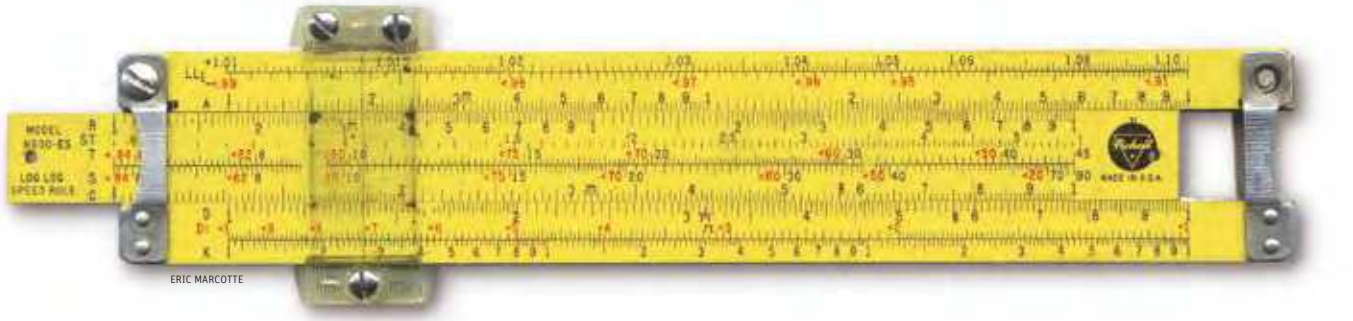
Die Stolperfalle der falsch gesetzten Dezimalkommastelle veranlasste jeden verantwortungsbewussten Ingenieur, seine Ergebnisse zweimal zu überprüfen. Zunächst schätzte er das ungefähre Ergebnis ab, dann verglich er es mit der ermittelten Zahl. Ein positiver Nebeneffekt war, dass die Benutzer sehr gut mit Zahlen vertraut und sich der systematischen und Rundungsfehler bewusst waren – im Gegensatz zu heutigen Ingenieuren, die nur noch Computerprogramme verwenden. Wer sich mit einem Ingenieur aus den 1950er Jahren unterhält, bekommt höchstwahrscheinlich ein Loblied auf die Tage zu hören, als Berechnungen und ein tieferes Verständnis der Materie noch Hand in Hand gingen.

Statt einen Computer mit Zahlen zu füttern, hatten damalige Forscher ein Verständnis für die Feinheiten von Belastungen und Dehnungen, Spannungen und Strömen, Winkeln und Distanzen. Per Hand ermittelte Zahlen lösten Probleme auf Grund von Wissen und Analyse – nicht durch Computersimulationen. Gezwungenermaßen lernten sie auch, Probleme zu vereinfachen.

## Die Kunst der Daumenregeln

Da lineare Gleichungen auf Rechenschiebern leichter zu bewältigen sind als komplexere Systeme, bemühten sich Wissenschaftler, mathematische Beziehungen zu linearisieren, wobei naturgemäß Glieder höherer Ordnung oft unter den Teppich gekehrt wurden. So kam es, dass Autoentwickler den Kraftstoffverbrauch hauptsächlich aus der Motorstärke berechneten und den mit zunehmendem Tempo steigenden Windwiderstand ignorierten. Ingenieure suchten

RICK FURR




nach Vereinfachungen und entwickelten Daumenregeln. Positiv betrachtet sparte das Zeit. Negativ war, dass diese Näherungen Fehler versteckten, Parameter überdimensionierten oder auch zu Fehlkonstruktionen führen konnten.

Da die Ingenieure sich auf grobe Berechnungen stützen mussten, gingen sie bei ihren Entwicklungen naturgemäß konservativ vor. Sie machten Mauern dicker als nötig, Flugzeugflügel schwerer und legten Brücken stärker aus. Solche Sicherheitszuschläge mögen die Verlässlichkeit und Haltbarkeit erhöht haben, verteuerten aber die Herstellung, reduzierten die Leistung und machten Produkte schwerfälliger.

Den schwierigen Umgang mit Rechenschiebern zu lernen, schreckte die breite Masse ab. Zwar gab es Lebensmittelhändler, die damit Rabatte berechnen konnten; und der Autor dieses Artikels ertappte einmal seinen Englischlehrer dabei, wie er während einer Klassenarbeit mit dem Gerät den Gewinner einer Dreierwette beim Pferderennen ermitteln wollte. Ins tägliche Leben drangen die Rechenschieber jedoch nie vor, da man mit ihnen nicht addieren und subtrahieren kann und weil es nicht jedem leicht fällt, die Dezimalkommastelle im Kopf zu behalten. So blieben die Geräte Werkzeuge für Techniker.

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelten sich mechanische Rechenmaschinen zu den wichtigsten Konkurrenten der Rechenschieber, und Anfang der 1960er Jahren begann der Siegeszug der Elektronik. Robert Ragen baute 1963 den »Friden 130« – einen der ersten elektronischen Rechner mit Transistoren. Das Gerät in der Größe eines Desktop-PCs beherrschte die vier Grundrechenarten und verblüffte damit, Ergebnisse geräuschlos mit 12-stelliger Genauigkeit zu liefern. Ragen erinnert sich daran, wie er dieses elektronische Wunderwerk ausschließlich mit analogen Werkzeugen entwickele: »Sämtliche Schaltungswerte, von den Transistorströmen bis zur Speicherauslegung, habe ich mit meinem ›Keuffel & Esser‹-Rechenschieber berechnet.« So half der Rechenschieber bei der Konstruktion eben der Maschine, die ihn überflüssig machte.

In den späten 1960er Jahren konnte man für ein paar hundert Dollar einen tragbaren elektronischen Taschenrechner mit den vier Grundrechenarten kaufen. 1972 präsentierte Hewlett-Packard den ersten wissenschaftlichen Taschenrechner – den HP-35 (Foto links unten). Der konnte alles, was auch ein Rechenschieber zu leisten vermochte – und noch einiges mehr. In seiner Bedienungsanleitung stand: »Wir dachten uns, Sie würden gern etwas besitzen wollen, was man sonst nur bei fiktiven Helden wie James Bond, Walter Mitty oder Dick Tracy erwarten wüde.«

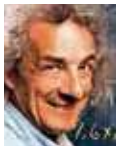
Dutzende anderer Hersteller folgten. Texas Instruments nannte sein Konkurrenzprodukt »Rechenschieber-Kalkulator«. In einem Versuch, beide Techniken zu vereinigen, produzierte Faber-Castell einen Rechenschieber mit einem Taschenrechner auf der Rückseite.

Der elektronische Taschenrechner beendete schließlich die Vorherrschaft der Rechenschieber. 1975 schaltete die Firma Keuffel & Esser ihre Gravur-Maschinen ab. Alle anderen bekannten Hersteller – Post, Aristo, Faber-Castell und Pickett – stellten die Produktion ebenfalls bald ein. Nachdem mehr als 40 Millionen Rechenschieber hergestellt worden waren, endete ihre Ära. Sie wurden in Schreibtischschubladen verstaut und verschwanden nach und nach von der Bildfläche – ebenso wie Bücher mit fünfstelligen Logarithmentafeln.

Heute hängt an meiner Wand noch ein zweieinhalb Meter langer Rechenschieber von Keuffel & Esser. Einst diente er dazu, meine Kommilitonen im Physikstudium in die Geheimnisse analoger Berechnungen einzuweihen. Jetzt ist er nur noch ein surfbrettgroßer Wandschmuck – ein Zeichen der Vergänglichkeit. Spät in der Nacht, wenn es in meinem Haus still geworden ist, unterhält er sich flüsternd mit meinem Pentium: »Pass bloß auf«, warnt er den Prozessor. »Man weiß nie, wann man seinem eigenen Nachfolger den Weg bereitet.« ◁

**Dieser Taschenrechner HP-35 versetzte den Rechenschiebern den Todesstoß. Das Mitte 1972 von Hewlett-Packard eingeführte tragbare Gerät kostete damals 395 Dollar, enthielt sechs integrierte Schaltkreise (insgesamt sechs Chips) und war mit einem Display aus roten Leuchtdioden ausgestattet. Den Strom lieferten drei AA-Batterien oder ein Netzteil.**

**Fahrt ins All: Der Pickett N600-ES war beim Apollo-Mondflug mit dabei.**



**Cliff Stoll** promovierte an der University of Arizona in Planetenphysik und arbeitete an verschiedenen Observatorien. Er wurde bekannt, als er in den Frühzeiten des Internets half, einen Hacker-Ring auszuheben, wie er in seinem Buch »The Cuckoo's Egg« schildert. Weitere Titel: »High Tech Heretic: Why Computers Don't Belong in the Classroom« und »Silicon Snake Oil«. Stoll befasst sich derzeit mit Kleinschen Flaschen und lehrt Physik an einer Highschool. Er lebt mit seiner Familie in Oakland/Kalifornien. Der Logarithmus der Anzahl seiner Kinder beträgt 0,301, und sie haben fast $10^{0,4772}$ Katzen.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Dennert & Pape ARISTO 1872–1978 mit 2 CD-ROMs. Von Klaus Kühn und Karl Kleine (Hg.). Zuckschwerdt-Verlag, 2004

Slide rules: their history, models and makers. Von Peter M. Hopp. Astragal Press, 1999

A history of the logarithmic slide rule and allied instruments. Von Florian Cajori. Erstveröffentlichung 1909, nachgedruckt von Astragal Press, 1994

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/866419

BILDBAND

# Unprätentiös und genial

Lennart Nilsson legt eine Zusammenfassung seines fotografischen Lebenswerks vor.

Leben, einfach nur Leben: So schlicht und groß wie das Thema ist der Blick, den Lennart Nilsson in seinem neuesten Bildband auf das Leben wirft. Der schwedische Wissenschaftsfotograf zeigt faszinierende Makroaufnahmen menschlicher Organe, feinster Muskelfasern oder einzelner Zellen; er macht Sars- und HI-Viren bei der Arbeit sichtbar. Vor allem aber lässt er den Betrachter teilhaben an der heimlichen Sensation, wenn das Wunderwerk Mensch zu leben beginnt.

Für seine spektakulären Aufnahmen des menschlichen Körpers ist Nilsson berühmt. Als er 1965 im amerikanischen Magazin »Life« die ersten Fotos eines Embryos im Mutterleib präsentierte, verkaufte sich das Heft 8 Millionen Mal. Sein Bildband »Ein Kind entsteht« erschien kurze Zeit später, hat weltweit Millionenauflagen erreicht und avancierte schnell zum Klassiker.

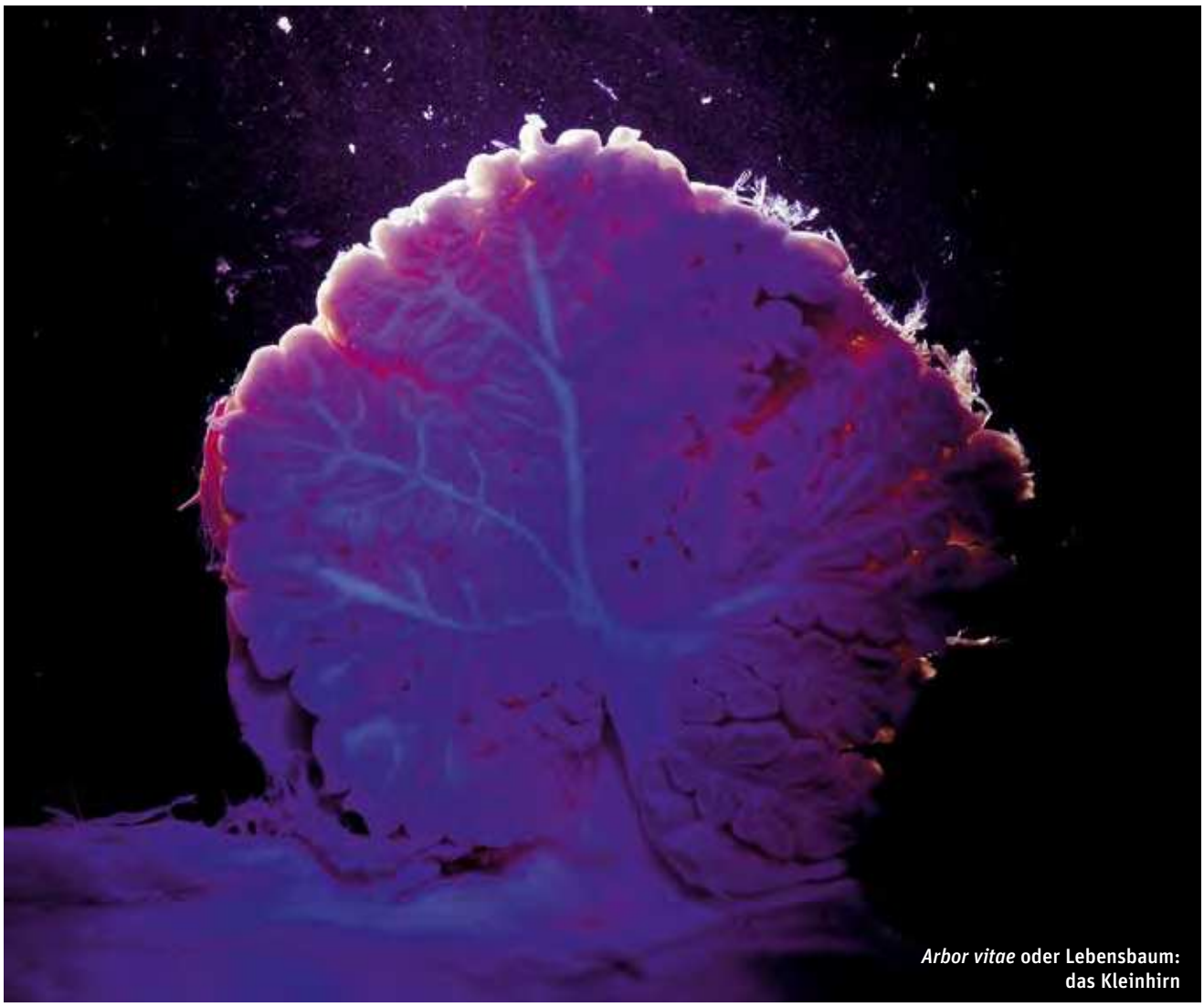
Immer genauere und immer frühere Bilder vom Beginn des Lebens gelangen ihm mit seiner elektronenmikroskopischen Kamera, stille und ausdrucksstarke Aufnahmen, die mit wissenschaftlich exaktem und dabei künstlerisch behutsamem, fast zärtlichem Blick die Embryonalentwicklung einfangen: vom ersten Aufeinandertreffen von Ei und Spermium über eine Art Tagebuch der Organreifung bis zum fertigen Menschlein kurz vor der Geburt. »Leben« fasst seine schönsten Bilder zusammen und dürfte so etwas wie das Vermächtnis des preisgekrönten Grandseigneurs der Wissenschaftsfotografie werden.

In dem angehängten Essay »Lennart und Leonardo« wird sogar der Bogen von dem Universalgenie der Renaissance zu dem mittlerweile 85-jährigen Nilsson gespannt, der übrigens derzeit an einer weiteren Dokumentation des Zellaufbaus arbeitet.

*Katharina Werle*

Die Rezensentin ist Leiterin der Schlussredaktion von Spektrum der Wissenschaft.

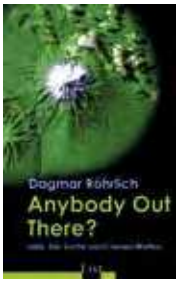
Lennart Nilsson (Bilder), Hans Wigzell (Essay)
**Leben**
Bilder aus dem Inneren des menschlichen Körpers
Aus dem Englischen von Rita Seuß. Knesebeck, München 2006. 304 Seiten, € 39,95



***Arbor vitae* oder Lebensbaum: das Kleinhirn**

ASTRONOMIE

# Eine dramatische Geschichte der Wissenschaft




Dagmar Röhrlich versteht es, eine sehr lange Geschichte kurzweilig wie einen Krimi zu erzählen.

**Pfannkuchenvulkan auf der Venus**

Vom Urknall bis zur Gegenwart einschließlich der Entstehung des Lebens auf der Erde und möglicherweise anderswo: Das ist ein gigantischer Themenbogen. Viele haben sich daran versucht – der Markt wimmelt von derlei Titeln – und sind kläglich gescheitert.

Ganz anders die viel gelesene Journalistin Dagmar Röhrlich. Auch sie gibt zum Schluss eine Antwort auf die Titelfrage »Hallo, ist dort draußen jemand?«. Aber was ihr Werk so attraktiv und bemerkenswert macht, ist die leichtfüßige Hinführung des Lesers zum letzten Stand der Astronomie, Geologie, Biologie und Paläontologie. Jahrelange Auseinandersetzung mit dem Thema, gründliche Literaturrecherche, Hintergrundgespräche mit Forschern und Expeditionen zu den entlegensten Winkeln der Erde bilden die Basis für ihr geradezu im Plauderton gehaltenes Buch.

Dass der Big Bang vor 13,7 Milliarden Jahren stattfand, zählt mittlerweile zum Allgemeinwissen. Aber wem ist schon geläufig, dass dieses Ereignis 1630 von einem Gelehrten, der auch noch irischer Erzbischof war, auf den »Abend vor dem 23. Oktober des Jahres 4004 vor Christus, um sechs Uhr« datiert wurde? Dem bildungshungrigen Leser offeriert Röhrlich noch manch andere Episode aus der Wiege der Urknall-Theorie: etwa die Geschichte vom unermüdlichen und höchst exzentrischen Sir Fred Hoyle (1915 – 2001). Er war in den 1950er Jahren einer der eifrigsten Kritiker der Theorie des Weltalls, die damals noch »dynamisches Entwicklungsmodell« hieß, verspottete die Vorstellung von einem definierten Anfang des Universums als »großen Knall« (»Big Bang«) – und musste erleben, wie sein Schimpfwort zum allgemein gebräuchlichen Namen der Theorie wurde.

Lange nach dem Anfang der Welt, als die »Singularität in einem unvorstellbar kurzen, grellen Lichtblitz … zu werden beschloss«, begann vor 4,6 Milliarden Jahren die Geschichte unseres Sonnensystems als »eine sehr staubige Angelegenheit«. Die Erde hatte einst einen Zwilling, die marsgroße Theia. Sie stürzte vor 4,527 Milliarden Jahren in einem »Giant Impact« in die Erde und schlug den Mond heraus – eine ganz wichtige Voraussetzung für Leben auf unserem Planeten, doch beileibe nicht die einzige.

Flüssiges Wasser, Energie – nicht zu wenig, nicht zu viel –, ein Tag-Nacht-Rhythmus, Ebbe und Flut, Mineralien und manch anderes sind notwendig, erfährt der Leser, damit ein Leben entsteht, das den drei Kriterien von Gerald Joyse vom kalifornischen Scripps-Forschungsinstitut genügt: Seine Basis ist erstens Chemie. Zweitens wächst Leben und erhält sich selbst durch Stoffaustausch mit seiner Umgebung. Und drittens können sich lebende Organismen durch Mutation und Selektion zu immer komplexeren Wesen fortentwickeln.

Aber wie erfolgt der Übergang von unbelebter zu belebter Materie? Voller Erzählfreude zeigt die Autorin dem Leser das legendäre Experiment von Stanley Miller und Harold C. Urey (1953), in deren anorganisch angerührter Ursuppe überraschend organische Verbindungen schwammen, und schaut Watson und Crick bei der Entschlüsselung der DNA-Struktur über die Schulter. Doch trotz aller Verheißungen, dass »bald aus irgendeinem Rundkolben ein Käfer krabbeln würde«, sei »die organische Chemie noch Lichtjahre weit von Biologie, von Leben entfernt«. Hier hält sie es mit dem Exzentriker Hoyle, der die spontane Bildung von Leben, von ersten lebenden Zellen auf der Erde für ungefähr so wahrscheinlich gehalten hatte wie die zufällige Verwandlung eines Schrottplatzes in einen voll flugfähigen Jumbojet, wenn gerade ein Tornado über das Gelände wirble.

Auch wenn Hoyles Ideen mittlerweile als verfehlt erkannt sind, klaffen in den Theorien noch breite Lücken. Aber Röhrlich zeigt dem erkenntnisfrohen Leser viele interessante Bruchstücke, die in der wissenschaftlichen Community allerdings umstritten sind: skurrile Wesen aus Ton, die der schottische Molekularbiologe Alexander Graham Cairns-Smith postuliert, oder den *Last Universal Common Ancestor* LUCA, den letzten universellen gemeinsamen Vorfahren, den hypothetischen Überlebenden der gigantischen Katastrophen, welche die frühe Erde heimsuchten (Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 52). Waren daran etwa Bio-Importe aus dem All beteiligt? Das glauben zumindest einige Wissenschaftler, die seit den 1960er Jahren mit dem Experiment Seti *(Search for Extraterrestrial Intelligence)* nach außerirdischer Intelligenz fahnden, seit 1999 mit Unterstützung tausender Freiwilliger per Internet.

Röhrlich nimmt den Leser mit auf ihre Suche nach den ältesten Zeugnissen von den Anfängen des Lebens und des Menschen auf unserem Planeten, auf Expeditionen in unwegsame Gefilde; nach Afrika, Australien, nach Grönland und in die Tiefsee. Sie lässt uns das Abenteuer hautnah miterleben; voller Exotik, Stimmung und Romantik.

Das Buch ist eine Zeitreise, eine dramatische Geschichte der Wissenschaft. Dabei wird der Weg immer fassettenreicher und unübersichtlicher; ein Ende ist noch nicht abzusehen. Und das Beste daran: Es liest sich wie ein Krimi – originell, voller überraschender Wendungen, herrlich frisch und spannend bis zur letzten Zeile.

*Reinhard Löser*

Der Rezensent ist promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt; er arbeitet als freier Journalist in Stuttgart.

Dagmar Röhrlich
**Anybody Out There?**
oder: Die Suche nach neuen Welten
List, Berlin 2006. 247 Seiten, € 19,95

PHILOSOPHIE

# Hat die embryonale Zelle eine Würde?

Ein führender Moralphilosoph und Vertreter des Utilitarismus gibt eine anspruchsvolle Zusammenfassung seiner Positionen zu Fragen der Bioethik.

Die rasante Entwicklung der Biotechnologie nötigt uns zu einer Auseinandersetzung mit den Chancen, den Risiken und der moralischen Bewertung der neuen Möglichkeiten. Wie ist die Forschung mit adulten und embryonalen Stammzellen moralisch zu bewerten? Ist therapeutisches und reproduktives Klonen sittlich zu rechtfertigen? Welche rechtlichen Grenzen sollte der Gesetzgeber bezüglich eugenischer Maßnahmen beschließen? Sind die visuelle und die genetische Präimplantationsdiagnostik (PID) moralisch verwerfliche Formen der Diagnose?

## Eine starke Form der Menschenwürde für alle Geborenen, eine schwache für die Ungeborenen?

Dieter Birnbacher, Professor für Philosophie in Düsseldorf und seit Jahrzehnten einer der führenden deutschen Moralphilosophen, hat in dem vorliegenden Band seine wichtigsten bioethischen Artikel seit 1990 zusammengefasst. Dabei umfasst »Bioethik« insbesondere auch Tier- und Umweltethik. Dem langen Zeitraum zum Trotz haben die angesprochenen Probleme nicht an Aktualität und Brisanz verloren.

Manche der ursprünglich in Fachzeitschriften publizierten Artikel sind für den Laien eher schwierig zugänglich, für das Fachpublikum dagegen unerlässliches Grundlagenmaterial. Das gilt insbesondere für die drei Artikel des ersten Teils »Grundlegende Fragen der Bioethik«. Birnbacher erörtert abstrakte, theoretische Fragen wie etwa das Verhältnis von Ethik und Bioethik und das angemessene Verständnis der Begriffe »Person« und »Menschenwürde«. In »Welche Ethik ist als Bioethik tauglich?« thematisiert er auf hervorragende Weise das Verständnis der Bioethik, das Verhältnis von Ethik und Bioethik, die Methodik der Angewandten Ethik sowie die Möglichkeiten der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Ethik.

In den weiteren Teilen »II. Naturbegriff und Ökologie«, »III. Um Leben und Tod« und »IV. Kontroversen der Medizinethik« bewegt sich Birnbacher zwar, seinem wissenschaftlichen Rang entsprechend, auf einem intellektuell anspruchsvollen Niveau, jedoch sind seine Ausführungen auf Grund ihrer klaren Struktur und ihrer pointierten Formulierungen durchaus nachvollziehbar.

Birnbacher argumentiert stets auf der Basis seiner Variante des Utilitarismus: Handle so, dass die Gesamtsumme des zu erwartenden Nutzens maximal wird, wobei alle Folgen deines Handels mit zu berücksichtigen sind (Spektrum der Wissenschaft 1/2005, S. 102). Diese konsequentialistische Ethik ist nicht ohne Alternative. Nach der Deontologie haben Menschen die Pflicht, sich für und egen bestimmte Handlungen zu entscheiden. Für Tugendethiker stehen nicht die Handlungen im Fokus der Bewertung, sondern die Eigenschaften des Handelnden. Beiden Ethiken kommt es nicht primär auf die Folgen des Handelns an.

In »Das Stammzellgesetz – ein Fall von Doppelmoral?« beschreibt und kritisiert Birnbacher auf treffende Weise die Biopolitik in Deutschland. Einerseits ist die offizielle deutsche Position von rigorosen Grundhaltungen geprägt. So hat Deutschland die Bioethikkonvention des Europarats noch nicht unterzeichnet, weil der Schutz von einwilligungsunfähigen Personen und von menschlichen Embryonen hinter dem Niveau des deutschen Rechts deutlich zurückbleibt. Viele Politiker deuten das hochrangige Prinzip der Menschenwürde so, dass menschliches Leben niemals nur als Mittel zum Zweck genutzt werden dürfe und dass das Menschsein mit der Verschmelzung von Ei- und Samenzelle beginne. Zudem seien der Begriff der menschlichen Würde und auch die Intensität des Schutzes in gleicher Weise auf das ungeborene menschliche Leben wie auf den geborenen Menschen anzuwenden. Aus dieser Position ist das Verbot der PID in Deutschland ohne Weiteres nachzuvollziehen, denn dabei werden dem Embryo totipotente Zellen entnommen. Da sich aus ihnen noch ein ganzer Organismus entwickeln kann, seien sie als ungeborenes menschliches Leben aufzufassen und müssten daher ebenso geschützt werden wie der geborene Mensch.

Andererseits haben wir in Deutschland eines der liberalsten Abtreibungsrechte der Welt. Diese widersprüchliche Situation ließe sich, so Birnbacher, durch die Aufhebung des strengen Prinzips der Menschenwürde auflösen. Es sei eine attraktive Lösung, zwischen einer starken Form von Achtung für alle geborenen Menschen und einer schwachen Form von Achtung für vorgeburtliches menschliches Leben zu unterscheiden.

Ich halte diesen Vorschlag grundsätzlich für sinnvoll und in die richtige Richtung weisend, obwohl ich es für unerlässlich halte, die normativen Implikationen noch wesentlich feingliedriger zu unterteilen. Es ist zu überdenken, ob die entscheidenden Einschnitte nicht eher an Fähigkeiten festzumachen sind als an dem Geburtsprozess oder ob zumindest in manchen Übergangsbereichen beide Kriterien zu berücksichtigen sind.

Klarheit, Präzision und profundes Wissen fallen in allen Artikeln Birnbachers auf. Der Leser gewinnt einen fundierten Einblick in die jeweilige Fragestellung, da Birnbacher zumeist den *state of the art* referiert, bevor er seine eigene Position darstellt. Obwohl er auf einem hohen philosophischen Niveau argumentiert (ein kurzer, nicht erläuterter Verweis auf das Zwei-Ebenen-Modell ist für den Uneingeweihten kaum nachvollziehbar), sind seine Beiträge mit gehöriger Bemühung durchaus zugänglich. Für das Fachpublikum sind sie von großem Interesse, da sich in ihnen ein präziser Denker ohne poetische Worthülsen, und ohne etwas unhinterfragt zu lassen, zu brisanten Fragestellungen äußert.

*Stefan Lorenz Sorgner*

Der Rezensent ist Mitarbeiter am Lehrstuhl für Angewandte Ethik an der Universität Jena.

Dieter Birnbacher
**Bioethik zwischen Natur und Interesse**
Suhrkamp, Frankfurt am Main 2006.
395 Seiten, € 14,–

**Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen**

**direkt bei: www.science-shop.de**
**per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de**
**telefonisch: 06221 9126-841**
**per Fax: 06221 9126-869**

# Wissenschaftlicher Familienausflug

Vom Multimar Wattforum in Tönning bis zum Zeppelin Museum Friedrichshafen werden 72 Museen mit Erlebnischarakter beschrieben.

Die Szene der wissenschaftlichen Erlebniszentren ist in den letzten Jahren aufgeblüht. Vom ältesten und größten deutschen Wissenschaftsmuseum, dem Deutschen Museum in München, bis zum kürzlich eröffneten »Phaeno« in Wolfsburg (Spektrum der Wissenschaft 3/2006, S. 80) finden sich mehr als hundert »Museen zum Anfassen« in Deutschland. Die drei Journalisten Max Annas, Hendrik Neubauer und Johannes Wendland haben sie während eines Jahres alle bereist, begleitet von Vertretern der Hauptzielgruppe in Gestalt ihrer Kinder, und 72 davon in die vorliegende Auswahl aufgenommen.

Herausgekommen ist ein – vom Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft geförderter – Reiseführer, der zu jedem Museum eine launig geschriebene und bebilderte Beschreibung sowie einen ausführlichen Informationsteil bietet. Seine Eignung konnten wir beim letzten Familienausflug austesten – mit erfreulichem Ergebnis: Von dem traditionsreichen Museum Alexander König in Bonn hatte ich zwar schon gehört, aber erst dieses Buch hat uns auf die Idee gebracht, es aufzusuchen, und die vielen schönen ausgestopften Tiere haben unserem vierjährigen Moritz die erwarteten Begeisterungsschreie entlockt.

Meine persönlichen Favoriten, darunter das Mathematikum in Gießen, das Meeresmuseum in Stralsund und das Universum in Bremen, sind sämtlich in der Liste vertreten. Manche Stätten der Bildung habe ich nicht so positiv erlebt, wie die Autoren sie beschreiben. So waren im Gegensatz zu mir meine – durchaus lesefähigen – Kinder nicht bereit, die vielen informationsreichen Schrifttafeln im Wikinger-Museum Haithabu zu studieren, und bewerteten den ganzen Besuch als nicht besonders gelungen, dem Riesen-Wikingerschiffsmodell zum Trotz. Wo Max Annas für das Auto und Technik Museum Sinsheim und dessen kleinen Bruder in Speyer lobende Worte findet – »Das große Boah!« –, waren wir auf die Dauer abgestoßen von dem Übermaß an Schieß- und Bombenwerfgerät, das obendrein noch vom Museum selbst mit prahlerischem Stolz angepriesen wird. Annas drückt das so aus, dass sich mit den herumstehenden Panzern »spielend ein mittelgroßer Krieg gewinnen lassen würde«.

Das Karlsruher Staatliche Museum für Naturkunde ist nicht vertreten, obgleich die ausgestopften Tiere hinter denen aus Bonn nicht wesentlich zurückstehen. Vielleicht hat zur Abwertung geführt, dass man in Karlsruhe sein Essen selbst mitbringen muss. Der Informationsteil führt nämlich neben Dingen wie Adresse, Öffnungszeiten, Eintrittspreisen und Weblinks auch eine empfohlene Verweildauer und das lokale Restaurant auf – das ist wichtig, wenn man die Zielgruppe bei Laune halten will. In diesem Zusammenhang sind die Autoren sogar zu streng mit dem Museum König. Es gebe eine deutlich bessere gastronomische Auswahl in Fußgängerentfernung. Stimmt; aber das Café des Hauses bietet alles – fett, süß, Ketschup –, was das Kinderherz begehrt. Das reicht doch.

*Christoph Pöppe*

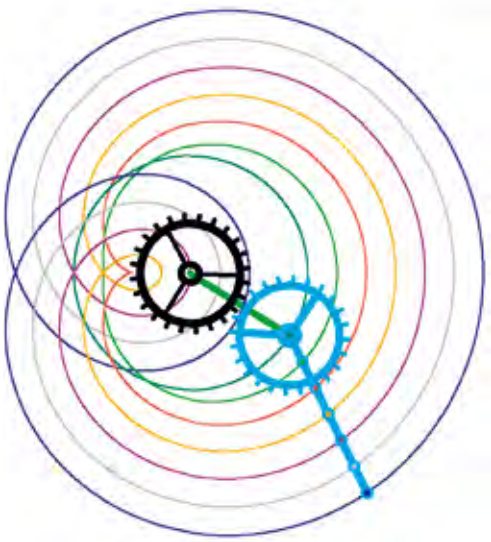
Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Hendrik Neubauer (Hg.)
**Erlebnis Wissen**
Die besten Erlebnismuseen und Science Center
Der Reiseführer
Bube, Pulheim 2006. 282 Seiten, € 19,90

***»Bigger than life«*: die Riesengitarre im Kinderreich des Deutschen Museums in München**

EPI- UND HYPOZYKLOIDEN

# Die Vielseitigkeit der Rollkurven



**Sie zeichnen nicht nur den Weg des Lichts in Kaustiken nach, sondern finden sich auch in dem bekanntesten Objekt der fraktalen Geometrie.**

Von Norbert Treitz

Rollt ein (Zahn-)Rad mit dem Radius $r$ von außen um ein ruhendes mit dem Radius $R$, so läuft ein Zahn von ihm (das heißt ein Punkt seines Umfangs) auf einer Kurve, die überall dort ihre charakteristischen, nach innen gerichteten Spitzen hat, wo der Zahn das ruhende Rad berührt. Sie heißt Epizykloide, weil der bewegliche Kreis »auf« (griechisch *epi*) dem ruhenden Kreis (*kyklos*, latinisiert *cyclus*) abrollt. Im letzten Monat habe ich erzählt, wie eine solche Kurve auch auf gänzlich unmechanischem Weg zu Stande kommen kann: als Kaustik (»Brennkurve«) eines Lichtbündels, das an einem Kreisrand reflektiert wird. Diesmal möchte ich Sie mit weiteren überraschenden Eigenschaften dieser Kurven bekannt machen.

Die Epizykloide hat eine »einwärtsgekehrte« Verwandte: Wenn das ruhende Rad seine Zähne nach innen gerichtet hat und in seinem Inneren ein (kleineres) Zahnrad abrollt, beschreibt einer von dessen Zähnen – an dem wir uns einen Bleistift angeklemmt vorstellen dürfen – eine Hypozykloide (von griechisch *hypo* unter). Wir haben diese Kurven als die optimalen Wege für innerirdische U-Bahnen kennen gelernt (Spektrum der Wissenschaft 12/2005, S. 110).

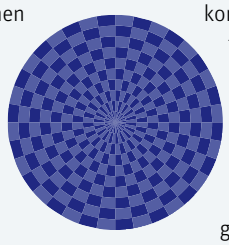
Wir können die beiden Zahnräder durch rotierende Zeiger (Vektoren) in der Ebene ersetzen, die aneinandergehängt sind (addiert werden). Dabei sitzt der erste Zeiger, dessen Länge wir $a$ nennen wollen, mit dem hinteren Ende fest im Mittelpunkt des ruhenden Rads und weist auf den Mittelpunkt des bewegten; der zweite, mit Länge $b$, geht von dort zur Position des Bleistifts. Es gilt also $a = R + r$ und $b = r$. Die Winkelgeschwindigkeiten der Zeiger verhalten sich umgekehrt wie ihre Längen. Ist deren Verhältnis $m = b/a$ eine rationale oder sogar ganze Zahl, so entsteht eine geschlossene Kurve, die sich für nicht ganzzahliges $m$ mehrfach überschneidet. Für irrationales $m$ schließt sich die Kurve nie.

Für positives $m$ ergeben sich Epizykloiden, insbesondere für $m = 2$ die Kardiodide, die als Kreis-Kaustik für eine Punktquelle auf dem Rand des Kreises auftritt (Bild oben), und für $m = 3$ die Nephroide, von der die Sonne – oder sonst eine ferne Lichtquelle – eine Hälfte in die Kaffeetasse zaubert. Hypozykloiden entstehen für negative $m$, mit dem Spezialfall der geradlinigen Strecke für $m = -1$: ein weiteres Beispiel für eine Geradführung (Spektrum der Wissenschaft 5/2006, S. 105).

Die entstehenden Kurven sind für ganzzahliges $m$ stets $(m-1)$-zählig drehsymmetrisch. Das gilt auch für negative $m$: Die Steiner-Deltoide ($m = -2$) hat

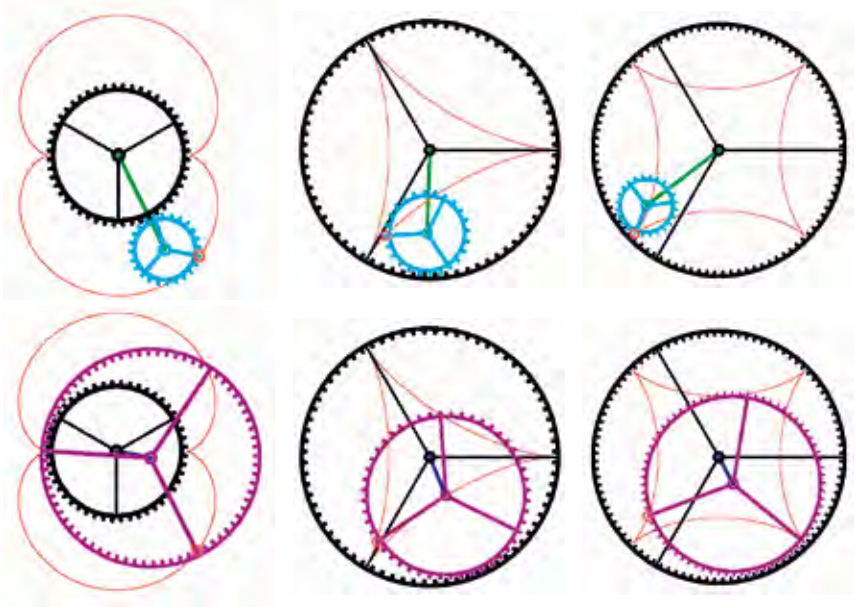
## Der karierte Kern der Mandelbrot-Menge

**Die hier gezeigten Bilder** der klassischen Mandelbrotmenge (rechts, linkes Bild) sowie ihrer Verallgemeinerung für $m = 4$ (rechtes Bild) sind für die Punkte außerhalb der Menge (Fall a) nach dem üblichen Verfahren konstruiert: Es wird für jeden Punkt $c$ bestimmt, nach wie vielen Iterationen die Folge $z_j$ einen vorher bestimmten (großen) Betrag erstmals überschreitet. Der Punkt wird dann hell- oder dunkelgrau eingefärbt je nachdem, ob diese Anzahl gerade oder ungerade ist.



Wenn die Iteration gegen einen Fixpunkt $z$ konvergiert (Fall b), dann liegt $z$ für $m = 2$ innerhalb des Kreises um den Nullpunkt mit Radius 1/2. Dieser Kreis ist durch Ringe der Breite 0,05 und durch Strahlen durch den Nullpunkt in 10·36 Ringsektoren geteilt, die wie ein rundgebogenes Schachbrett oder eine »rundkarierte« Zielscheibe abwechselnd dunkel- und mittelblau gefärbt werden (kleines Bild). Der Punkt, der dem Parameter $c$ entspricht, wird nun so eingefärbt wie der Punkt $z$, gegen den die zugehörige Folge konvergiert – wenn sie konvergiert. Aus dem rundkarierten Kreis entsteht dadurch eine – ziemlich verzerrt – rundkarierte Kardioiden-Innenfläche. Für $m = 3$ ergibt sich aus einem etwas größeren Kreis die uns schon vertraute Nephroide. Für größere $m$ sind die Ränder der Konvergenzbereiche ebenfalls exakte Epizykloiden.

Die anderen Farben bezeichnen Punkte mit zyklischem Konvergenzverhalten. Die Ordnung $n$ des Zyklus wird durch die am unteren Rand erklärten Farben angezeigt, für $n > 11$ weiß.



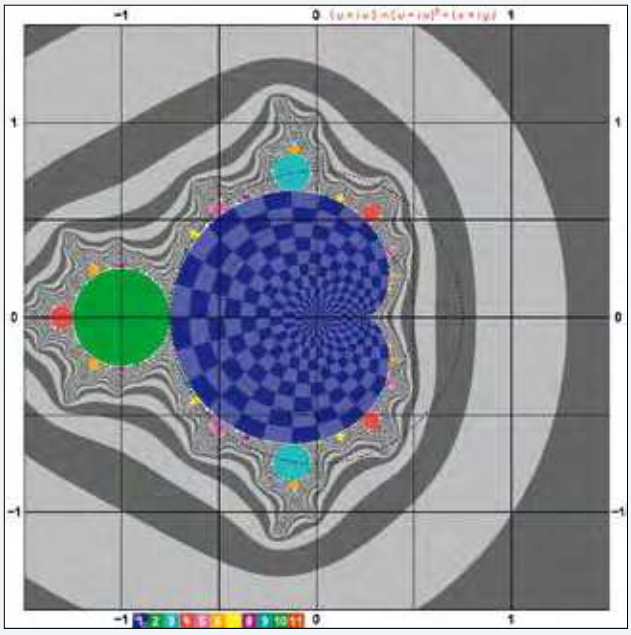
**Ein Zahnrad (hellblau), das an einem ruhenden Zahnrad gleicher Größe (schwarz) abrollt, zeichnet je nachdem, wo auf seiner (verlängerten) Speiche der Bleistift sitzt, verschiedene Limaçon-(»Schnecken«-)Kurven. Insbesondere erzeugt ein Stift auf dem Umfang des Rads die Kardioide (rot). Rechts: Ein und dieselbe Epi- oder Hypozykloide (von links nach rechts: Nephroide, Deltoide und Astroide) kann durch jeweils zwei verschiedene Zahnradpaare erzeugt werden.**

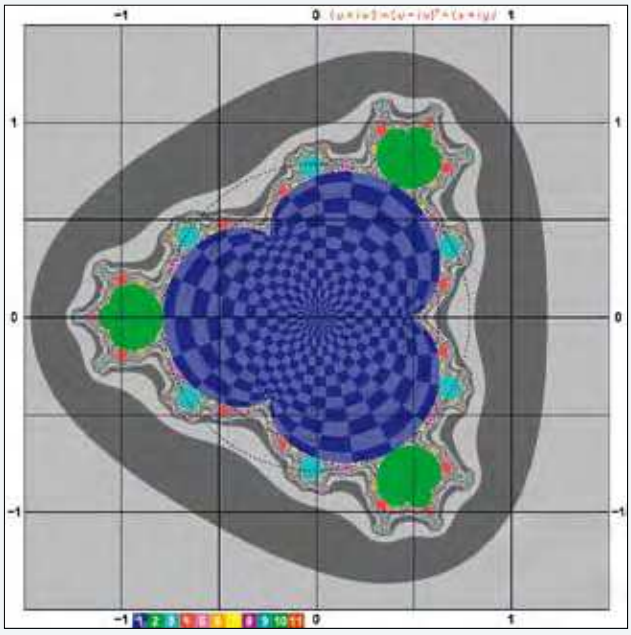
eine Dreier-, die Astroide ($m=-3$) eine Vierersymmetrie.

Um eine Epizykloide zu erzeugen, muss das bewegliche Rad seinen Mittelpunkt nicht unbedingt außerhalb des ruhenden haben. Es darf auch ein großes Rad mit Innenzähnen sein, das seinen ruhenden Partner umgibt und um ihn läuft wie ein Hula-Hoop-Reifen um den Bauch eines Menschen. Letzterer wäre allerdings sehr unsportlich, denn er bewegt sich dabei nicht und ist kugeldick, genauer: Er hat einen kreisrunden Bauchquerschnitt. Man findet für die so erzeugte Kurve gelegentlich die Bezeichnung »Perizykloide«, die aber überflüssig ist, denn die fertige Kurve ist nichts anderes als eine Epizykloide.

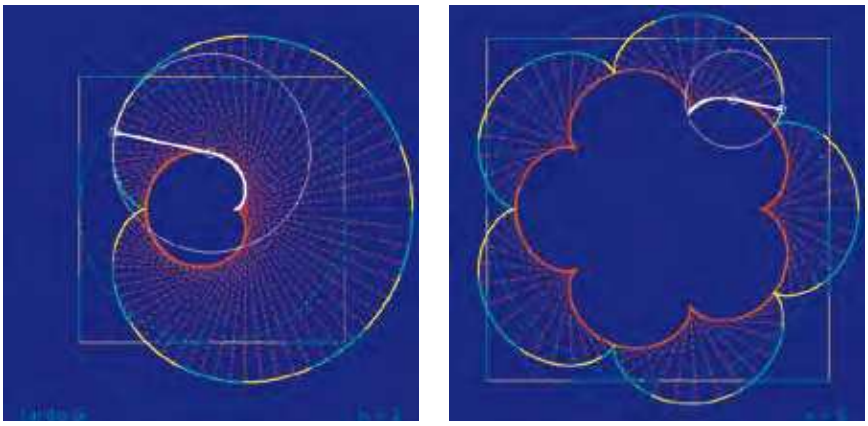
Auch eine Hypozykloide kann auf zwei verschiedene Arten erzeugt werden. Ob im Inneren eines ruhenden Zahnrads vom Radius $R$ ein Zahnrad mit Radius $r$ abrollt oder eines mit Radius $R-r$ in Gegenrichtung, sieht man der fertigen Kurve nicht an (Bilder oben).

Verallgemeinerungen der Epi- und Hypozykloiden sind die Epi- und Hypotrochoiden. Man erhält sie, wenn man den Bleistift nicht unbedingt auf den Umfang des bewegten Rads, sondern auf eine Speiche oder die Verlängerung einer Speiche setzt. Epi- und Hypotrochoiden kann man ebenfalls mit zwei Zeigern sowie auf je zwei Arten mit Zahnrädern erzeugen. Übrigens: Zykloiden und Trochoiden ohne den Vorsatz Epi- oder Hypo- sind wieder etwas anderes, nämlich die Bahnen eines Bleistifts auf einem Rad, das auf einer Geraden abrollt. Leider sind die Bezeichnungen nicht einheitlich. Manche Autoren, darunter Gino Loria, der Verfasser des klassischen ▷





ALLE ABBILDUNGEN DIESES ARTIKELS: NORBERT TREITZ



**Die rote Epizykloide ist die Evolute der blau-gelben, diese eine Evolvente der roten. Die dicke weiße Linie (der »Faden«) liegt zum einen Teil auf dem Umfang der kleineren Epizykloide und bildet zum anderen den Radius des Krümmungskreises der größeren. Die gelben und hellblauen Abschnitte auf dem Quadrat sind genau so lang wie die entsprechenden Kurvenstücke.**

▷ Werks zur Kurvengeometrie, sprechen von -zykloiden statt -trochoiden und müssen die dann auf wenig elegante Weise in Unterklassen einteilen.

Die Website http://www.spektrum.de/KaustikAnim/ani.htm zeigt eine Auswahl aus der großen Fülle dieser Kurvenklassen. Alle Ellipsen zählen dazu, insbesondere die Ellipsen mit kleiner Halbachse 0, besser bekannt unter dem Namen Strecken, aber auch konzentrische und exzentrische Kreise, Rhodoneen (»Rosenlinien«), die durch den Nullpunkt gehen, und die nach Étienne Pascal (dem Vater des berühmteren Blaise) benannten Kurven, die unter dem Namen »Limaçon«, einer veralteten französischen Bezeichnung für »Schnecke«, bekannt sind.

## Evoluten und Evolventen

Man befestige einen Faden an einem Punkt einer Kurve, zum Beispiel einer Epizykloide, lege diesen Faden straff gespannt um ein Stück der Kurve und stecke in eine Öse am freien Ende des Fadens einen Bleistift. Wenn man diesen nun bewegt, sodass sich der nach wie vor straff gespannte Faden allmählich von der Kurve löst, beschreibt die Bleistiftspitze eine so genannte Evolvente (»auswickelnde Kurve«) der Ursprungskurve. Da man sich die Länge des freien Fadenendes aussuchen kann, gibt es zu einer Kurve eine unendliche Schar von Evolventen.

Von einer Evolventen $B$ einer Kurve $A$ erhält man $A$ zurück als den geometrischen Ort aller Krümmungskreismittelpunkte von $B$. Die Kurve $A$ heißt dann auch die Evolute von $B$.

Für die Epizykloiden (und auch für die Hypozykloiden) sind Kurve und Evolute zueinander ähnlich. Wählen wir bei einer Epizykloide der Ordnung $m$ (also mit $m-1$ Spitzen) den Faden so lang, dass er genau den halben Weg von einer Spitze zur nächsten abdeckt. Dann ist die zugehörige Evolvente eine im Maßstab $(m+1):(m-1)$ vergrößerte Version der Ursprungskurve und gegen diese um $1/(2m)$ des Vollwinkels verdreht (Bilder oben).

## Äpfel und andere Epizykloiden in Mandelbrot-Mengen

Die Kardioide findet sich noch an einer ganz anderen Stelle wieder, nämlich als der Apfel im »Apfelmännchen«, besser bekannt unter dem Namen »Mandelbrot-Menge«. Seit der Mathematiker Benoît Mandelbrot sie 1979 bei Computerexperimenten entdeckte, ist sie so etwas wie das Markenzeichen der fraktalen Geometrie geworden. Sie bietet mit ihrer unendlich stachligen Gestalt, die in jeder Vergrößerung neue Details zeigt, genügend Stoff für eine ganze Theorie. Beschränken wir uns hier auf das Nötigste.

Es geht um die Iteration der Funktion $f(z)=z^2+c$ in der komplexen Ebene. Man kann komplexe Zahlen wie in diesem Fall $z$, $c$ und $f(z)$ als Paare von reellen Zahlen und damit als Punkte in der Ebene auffassen – und abbilden –, außerdem aber mit ihnen rechnen: Man schreibt ein Zahlenpaar $(x, y)$ als $x+iy$ und rechnet wie gewohnt unter Beachtung der Rechenregel, dass $i^2=-1$ ist (die komplexe Zahl $i$ heißt die imaginäre Einheit).

Man nimmt nun einen Punkt $z_0$ der komplexen Ebene ($z_0=0$ ist eine gute Wahl) und wendet darauf die Funktion $f$ an: $z_1=f(z_0)$. Auf das Ergebnis wendet man wieder die Funktion an und so weiter: $z_2=f(z_1)$, $z_3=f(z_2)$, … Je nach dem Wert des dabei festgehaltenen Parameters $c$ kann die so definierte Punktfolge $z_0, z_1, z_2, \ldots$

▶ (a) betragsmäßig über alle Grenzen wachsen,

▶ (b) gegen einen festen Punkt streben (konvergieren),

▶ (c) gewisse Punkte immer wieder in derselben Reihenfolge und mit zunehmender Genauigkeit aufsuchen oder

▶ (d) zwar beschränkt bleiben, aber auf die Dauer weder konstant (Fall b) noch periodisch (Fall c) werden.

Der letzte Fall ist das berüchtigte »Chaos«, das in unserem Zusammenhang allerdings nicht von Belang ist.

Die Mandelbrot-Menge ist die Menge derjenigen Punkte $c$, für die Fall a nicht eintritt. Um zu entscheiden, ob das der Fall ist, müsste man die Funktion $f$ unbegrenzt oft anwenden. In der Praxis ist das nicht so dramatisch (was bereits den PC-Benutzern der 1980er Jahre erfreuliche Bilderzeugungsmöglichkeiten verschaffte). Wenn die Folge $z_j$ einen gewissen Kreis um den Nullpunkt erst einmal verlassen hat, kommt sie mit Sicherheit nicht zurück, und man braucht nicht weiter nachzurechnen.

Der Fall b ist relativ übersichtlich: Damit ein Punkt $z$ überhaupt Grenzwert einer unserer Punktfolgen sein kann, muss er ein Fixpunkt von $f$ sein, das heißt die Gleichung $z=z^2+c$ erfüllen, und darüber hinaus ein »attraktiver Fixpunkt«. Er muss gewissermaßen die Punkte in seiner Umgebung anziehen, sodass eine Punktfolge, die in seine Nähe gerät, gar nicht anders kann, als in seine Arme zu sinken. Mit Hilfe der Analysis verwandelt man diese poetische Umschreibung in eine schlichte Ungleichung für $z$ mit dem Ergebnis, dass $z$ im Inneren des Kreises um den Nullpunkt mit Radius 1/2 liegen muss. Das wiederum lässt sich in eine Bedingung an den Parameter $c$ übersetzen: $c$ muss im Inneren einer Kardioide liegen. Das ist der Apfel im Apfelmännchen.

Anstelle der klassischen Iterationsfunktion $f(z)=z^2+c$ kann man auch ihre Verallgemeinerung $f(z)=z^m+c$ betrach-

ten, wobei der Exponent $m$ größer als 2 oder sogar negativ sein darf. Es ergeben sich verallgemeinerte Apfelmännchen, in denen die Punkte, die zu Fall b gehören, für $m > 2$ im Inneren einer Epizykloide mit $m-1$ Spitzen liegen. Für negative $m < -1$ sind es Hypozykloiden.

Die unendlich vielen »Knospen«, die am Hauptkörper des Apfelmännchens sitzen, enthalten Punkte mit zyklischem Konvergenzverhalten (Fall c). So streben bei einem $n$-Zyklus die Werte $z_j$ abwechselnd $n$ verschiedene Punkte immer genauer an. Für $m = 2$ sind die Bereiche zyklischer Konvergenz aneinanderhängende Kreisscheiben, die zusammen eine fraktale und annähernd selbstähnliche Struktur bilden. Bei höheren $m$ haben diese Bereiche qualitative Ähnlichkeit zu Epizykloiden, zum Beispiel zu Kardioiden bei $m = 3$.

Nach diesem Ausflug in die Radlinien kehren wir im nächsten Heft wieder zu den Katakaustiken zurück, von denen wir hier zwei näher besehen haben, und finden erstaunliche Zusammenhänge. Auch begegnen wir einem großen sächsischen Erfinder. ◁

**Norbert Treitz** ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

AUTOR UND LITERATUR

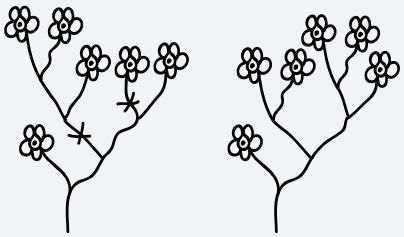
Was haben Rollkurven und Mandelbrotmengen miteinander zu tun? Von Herbert Zeitler in: Didaktik der Mathematik, Bd. 23, S. 276, 1995

Spezielle algebraische und transcendente ebene Kurven. Theorie und Geschichte. Band II. Von Gino Loria. Teubner, Leipzig 1911

## PREISRÄTSEL

# Die Hydrazinthe

Von Paul von der Heyde



**Die Hydrazinthe ist eine Pflanze,** die als junger Spross aus einem Stiel mit einer Blüte besteht. Sie verändert sich nur, wenn ein oder mehrere Stiele durchtrennt werden. Dann wächst über Nacht jeder durchtrennte Stiel nach und treibt zwei neue Stiele mit je einer Blüte. Als Beispiel zeigt der rechte Teil der Skizze eine Pflanze, bei der am Vortag die im linken Teil markierten Stiele durchtrennt wurden.

Ein wesentlich größeres und üppiger blühendes Exemplar dieser Art steht in Peter Silies Garten. Gestern durchtrennte Peter sieben Stiele der Pflanze und sammelte die herabgefallenen Teile auf, um sie heute seiner Frau Petra als Geburtstagsstrauß zu schenken. »Oh Peter, wie hübsch«, freut sich Petra, »für jedes Jahr eine Blüte!« Tatsächlich, die Blütenanzahl entspricht genau ihrem Alter.

Weniger erfreulich ist der Anblick der Hydrazinthe im Garten: Im Vergleich zum Zustand vor Peters Eingriff hat sie heute nur noch ein Drittel der Blüten und 32,8 Prozent der Stiele.

Wie alt wurde Petra heute?

**Schicken Sie Ihre Lösung** in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg oder per E-Mail an preisraetsel@spektrum.com. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zwei Zauberwürfel »Spektrum Cube«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 17. 04. 2007, eingehen. Unsere Preisrätsel finden Sie auch im Internet unter www.spektrum.de/preisraetsel.

## Lösung zu »Wie alt bin ich?« (Februar 2007)

**Der Mathematiker** ist am 6. 7. 1722 geboren, war am 6. 7. 1764 genau 42 Jahre alt und machte die Aussage über sein Alter am 23. 2. 1771.

Bezeichnet man das genannte Alter des Mathematikers mit $n = xy$, so erhält man folgende Bedingungen:

Für ein zulässiges Datum gilt $x \leq 31$ und $y \leq 12$, ferner $n \leq 44$ (denn das Jahr $45^2 = 2025$ liegt bereits in der Zukunft). In diesem Bereich ist $(n+1)^2 - n^2 = 2n+1$ stets kleiner als 165, also darf es im Jahr $(n+1)^2$ kein Datum der genannten Art geben (»Frühestens in 165 Jahren …«). Dies ist nur möglich, wenn $n+1$ keinen Primfaktor $\leq 31$ hat, also selbst eine Primzahl ist. Außerdem muss $(n+2)^2 - n^2 \geq 165$ gelten, was auf die Bedingung $n \geq 41$ führt.

Damit erhält man $n + 1 = 43$, die einzige Primzahl in diesem Bereich. Somit ist $n = 42$, und der Mathematiker war im Jahre $42^2 = 1764$ genau 42 Jahre alt, ist also im Jahr 1722 geboren. Sigrid Bader schreibt: »Mit $xy = 42 = 2 \cdot 3 \cdot 7$ erhält man vier mögliche Geburtstage, nämlich 21. 2., 14. 3., 7. 6. und 6. 7., und damit ein später Geborener frühestens in 165 Jahren eine entsprechende Aussage machen kann, darf er nicht ebenfalls 1722 geboren sein. Also ist der Mathematiker am spätestmöglichen Tag geboren.«

Entsprechend feiert der später Geborene am frühestmöglichen Datum (22. 2.) im Jahr $44^2 = 1936$ seinen 44. Geburtstag und kann frühestens am nächsten Tag in der Vergangenheitsform darüber sprechen. Genau 165 Jahre früher machte also der Mathematiker seine Aussage.

Für den Fall, dass man Jahreszahl und Alter nicht als Produkt der Zahlen $x$ und $y$ beziehungsweise $x^2$ und $y^2$, sondern als Zeichenkette auffasst, sind Lösungen nur möglich, wenn man extrem lange Lebensspannen (über 100 Jahre) annimmt (etwa einen 93. Geburtstag im Jahr 819 und danach einen 101. Geburtstag im Jahr 1001).

Unter Berücksichtigung führender Nullen im Datum hat Roman Wurdack die möglichen Daten 01. 09. 0181 und 02. 01. 0401 gefunden, die Aussage erfolgt also am 03. 01. 0236.

Die Gewinner der beiden Bücher »Lernen« sind Norbert Pfannerer, Wien und Barbara Lachnit, Erzhausen.

**Lust auf noch mehr Rätsel?** Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt – die Wissenschaftszeitung im Internet (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

ten, wobei der Exponent $m$ größer als 2 oder sogar negativ sein darf. Es ergeben sich verallgemeinerte Apfelmännchen, in denen die Punkte, die zu Fall b gehören, für $m > 2$ im Inneren einer Epizykloide mit $m-1$ Spitzen liegen. Für negative $m < -1$ sind es Hypozykloiden.

Die unendlich vielen »Knospen«, die am Hauptkörper des Apfelmännchens sitzen, enthalten Punkte mit zyklischem Konvergenzverhalten (Fall c). So streben bei einem $n$-Zyklus die Werte $z_j$ abwechselnd $n$ verschiedene Punkte immer genauer an. Für $m = 2$ sind die Bereiche zyklischer Konvergenz aneinanderhängende Kreisscheiben, die zusammen eine fraktale und annähernd selbstähnliche Struktur bilden. Bei höheren $m$ haben diese Bereiche qualitative Ähnlichkeit zu Epizykloiden, zum Beispiel zu Kardioiden bei $m = 3$.

Nach diesem Ausflug in die Radlinien kehren wir im nächsten Heft wieder zu den Katakaustiken zurück, von denen wir hier zwei näher besehen haben, und finden erstaunliche Zusammenhänge. Auch begegnen wir einem großen sächsischen Erfinder. ◁

**Norbert Treitz** ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

AUTOR UND LITERATUR

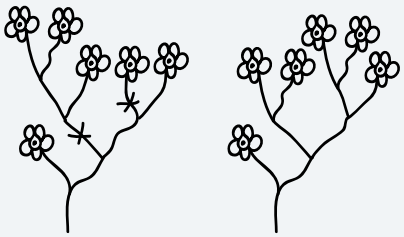
Was haben Rollkurven und Mandelbrotmengen miteinander zu tun? Von Herbert Zeitler in: Didaktik der Mathematik, Bd. 23, S. 276, 1995

Spezielle algebraische und transcendente ebene Kurven. Theorie und Geschichte. Band II. Von Gino Loria. Teubner, Leipzig 1911

## PREISRÄTSEL

# Die Hydrazinthe

Von Paul von der Heyde



**Die Hydrazinthe ist eine Pflanze,** die als junger Spross aus einem Stiel mit einer Blüte besteht. Sie verändert sich nur, wenn ein oder mehrere Stiele durchtrennt werden. Dann wächst über Nacht jeder durchtrennte Stiel nach und treibt zwei neue Stiele mit je einer Blüte. Als Beispiel zeigt der rechte Teil der Skizze eine Pflanze, bei der am Vortag die im linken Teil markierten Stiele durchtrennt wurden.

Ein wesentlich größeres und üppiger blühendes Exemplar dieser Art steht in Peter Silies Garten. Gestern durchtrennte Peter sieben Stiele der Pflanze und sammelte die herabgefallenen Teile auf, um sie heute seiner Frau Petra als Geburtstagsstrauß zu schenken. »Oh Peter, wie hübsch«, freut sich Petra, »für jedes Jahr eine Blüte!« Tatsächlich, die Blütenanzahl entspricht genau ihrem Alter.

Weniger erfreulich ist der Anblick der Hydrazinthe im Garten: Im Vergleich zum Zustand vor Peters Eingriff hat sie heute nur noch ein Drittel der Blüten und 32,8 Prozent der Stiele.

Wie alt wurde Petra heute?

**Schicken Sie Ihre Lösung** in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg oder per E-Mail an preisraetsel@spektrum.com. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zwei Zauberwürfel »Spektrum Cube«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 17. 04. 2007, eingehen. Unsere Preisrätsel finden Sie auch im Internet unter www.spektrum.de/preisraetsel.

## Lösung zu »Wie alt bin ich?« (Februar 2007)

**Der Mathematiker** ist am 6. 7. 1722 geboren, war am 6. 7. 1764 genau 42 Jahre alt und machte die Aussage über sein Alter am 23. 2. 1771.

Bezeichnet man das genannte Alter des Mathematikers mit $n = xy$, so erhält man folgende Bedingungen:

Für ein zulässiges Datum gilt $x \leq 31$ und $y \leq 12$, ferner $n \leq 44$ (denn das Jahr $45^2 = 2025$ liegt bereits in der Zukunft). In diesem Bereich ist $(n+1)^2 - n^2 = 2n+1$ stets kleiner als 165, also darf es im Jahr $(n+1)^2$ kein Datum der genannten Art geben (»Frühestens in 165 Jahren …«). Dies ist nur möglich, wenn $n+1$ keinen Primfaktor $\leq 31$ hat, also selbst eine Primzahl ist. Außerdem muss $(n+2)^2 - n^2 \geq 165$ gelten, was auf die Bedingung $n \geq 41$ führt.

Damit erhält man $n + 1 = 43$, die einzige Primzahl in diesem Bereich. Somit ist $n = 42$, und der Mathematiker war im Jahre $42^2 = 1764$ genau 42 Jahre alt, ist also im Jahr 1722 geboren. Sigrid Bader schreibt: »Mit $xy = 42 = 2 \cdot 3 \cdot 7$ erhält man vier mögliche Geburtstage, nämlich 21. 2., 14. 3., 7. 6. und 6. 7., und damit ein später Geborener frühestens in 165 Jahren eine entsprechende Aussage machen kann, darf er nicht ebenfalls 1722 geboren sein. Also ist der Mathematiker am spätestmöglichen Tag geboren.«

Entsprechend feiert der später Geborene am frühestmöglichen Datum (22. 2.) im Jahr $44^2 = 1936$ seinen 44. Geburtstag und kann frühestens am nächsten Tag in der Vergangenheitsform darüber sprechen. Genau 165 Jahre früher machte also der Mathematiker seine Aussage.

Für den Fall, dass man Jahreszahl und Alter nicht als Produkt der Zahlen $x$ und $y$ beziehungsweise $x^2$ und $y^2$, sondern als Zeichenkette auffasst, sind Lösungen nur möglich, wenn man extrem lange Lebensspannen (über 100 Jahre) annimmt (etwa einen 93. Geburtstag im Jahr 819 und danach einen 101. Geburtstag im Jahr 1001).

Unter Berücksichtigung führender Nullen im Datum hat Roman Wurdack die möglichen Daten 01. 09. 0181 und 02. 01. 0401 gefunden, die Aussage erfolgt also am 03. 01. 0236.

Die Gewinner der beiden Bücher »Lernen« sind Norbert Pfannerer, Wien und Barbara Lachnit, Erzhausen.

**Lust auf noch mehr Rätsel?** Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt – die Wissenschaftszeitung im Internet (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

# Die Fortschrittsillusion

**Wir sehen Fortschritt, weil unser Gehirn dafür konstruiert ist, stets zu vergleichen und zu bewerten. Wahrscheinlich aber existiert er nur in unserer naiven Vorstellung.**

Von Eckart Voland

Wissenschaft entlarvt Illusionen. Vor der zersetzenden Kraft ihrer schonungslosen Analyse scheint nichts sicher. Ob die Illusion von Erdscheibe und Himmelsgewölbe, das »Ich« und der »freie Wille«, ob die Linearität eines Zeitstroms oder auch nur die bunte Farbenpracht in der Welt »da draußen«. All dies gibt es nicht in einem objektiven Sinn, wie man naiv meinen könnte, sondern diese Ideen sind Konstrukte des Gehirns, die sich evolutionär bei der Meisterung des Lebens bewährt haben.

Die Evolution setzt bekanntlich auf Nützlichkeit und nicht auf das bestmögliche Erkennen irgendeiner vorfindlichen Objektivität. Das »Ich« ist ein Selbstmodell des Gehirns, der »freie Wille« eine soziale Attribution, und die Farben sind vom Gehirn generierte Erlebnisqualitäten bloßer elektromagnetischer Strahlung in einer absolut farblosen Welt. Ob Fortschritte in der Kosmologie, Neurobiologie oder in den anderen naturwissenschaftlichen Unternehmungen: Paradoxerweise scheint mehr denn je Skepsis bei der erkenntnistheoretisch so bedeutsamen Frage angebracht, ob und in welcher Weise wir die Welt »da draußen« außerhalb unseres Bewusstseins überhaupt erkennen können. Gerade wegen der Wissensvermehrung scheint uns die Welt unzugänglicher, unplausibler, irrealer, distanzierter, illusionärer denn je zuvor, und Selbstverge-

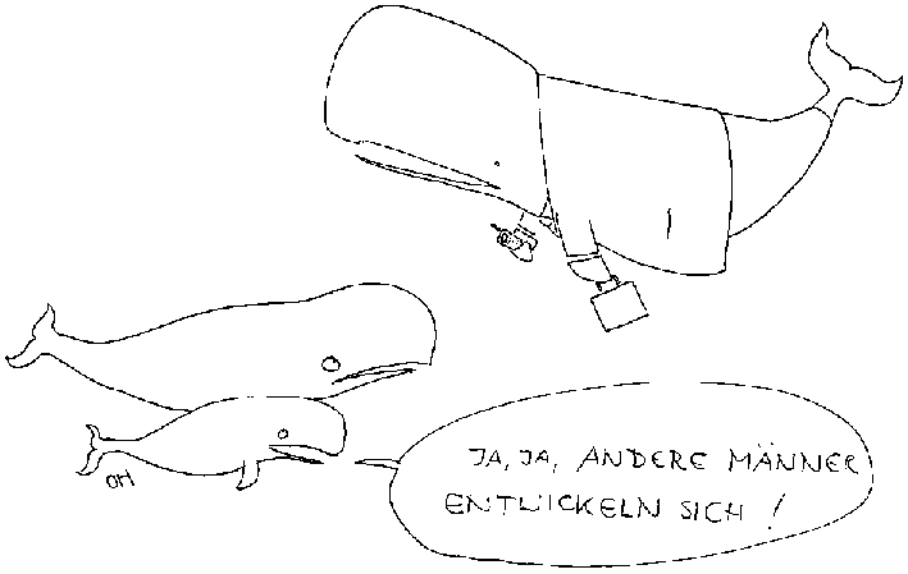
## Die Online-Debatte

Dieser Essay steht seit Ende Januar auf der Website von Spektrum der Wissenschaft. Wir haben die Online-Leser um Stellungnahme gebeten und eine Vielfalt von Reaktionen erhalten. Auszüge aus einigen dieser Briefe und eine Replik des Autors können Sie hier lesen. Die ungekürzten Fassungen und weitere Kommentare finden Sie unter www.spektrum.de/voland.

**Susanne Irmer, Nürnberg:**
Die Welt ist subjektiv – na und? Dass es keine wirkliche Objektivität gibt, ist keine neue Erkenntnis. Die Welt kann vom Gehirn nun einmal nur subjektiv erfasst werden. Dementsprechend könnte man in Anlehnung an Einstein sagen: Alles ist subjektiv.

Wenn aber die einzige Art der Wirklichkeit subjektiv ist und damit, nach Meinung des Autors, illusorisch, ist ein illusorischer Fortschritt wirklich.

**Jonas Schnaitmann, München:**
»Fortschritt ist der Evolution wesensfremd« – genau das ist doch die große Errungenschaft des menschlichen Geistes, dass er es geschafft hat, sich von der Evolution loszulösen. Genau hier liegt der Widerspruch des Artikels: Über sich selbst und die Konstrukte der eigenen Rasse nachzudenken liegt sicher auch nicht im Wesen der Evolution, doch der Autor tut genau dies und – übertrieben gesagt – beschwert sich darüber, dass der Mensch sich das zu Nutze macht.




wisserungen wie das Descartes'sche »Ich denke, also bin ich« gelten schon längst nicht mehr.

Die Enttarnung der evolutionär nützlichen Weltzugänge als konstruierte Illusionen des Zentralnervensystems stößt auf unterschiedliche Akzeptanz, wobei es ganz so aussieht, als ob der Widerstand gegen die neuen Weltbilder umso massiver ausfällt, je stärker die ganz persönliche Selbstwahrnehmung betroffen ist, je stärker also das Modell des Gehirns von sich selbst in Frage gestellt wird. Wie sonst wäre die Aufgeregtheit zu verstehen, die zwar mit der wissenschaftlichen Desillusionierung des »Ich« und des »freien Willens« einhergeht, aber kaum mit den ebenso irritierenden und kontraintuitiven Modellen der Mikrophysik oder Kosmologie. Gehirne ähneln dogmatischen Egozentrikern, die erst mühsam lernen müssten, andere Perspektiven einzunehmen, aber nicht einsehen können, warum sie das eigentlich mit Bezug auf sich selbst tun sollten.

Zu den nützlichen Konstruktionen des Gehirns gehört auch die Idee des Fortschritts. Vielleicht mit Ausnahme einiger pessimistisch gestimmter Misanthropen würde man die menschliche Geschichte trotz aller gewesenen natürlichen und kulturellen Katastrophen ▷

**Anna Reeves, London:**
Wenn man von so falschen Annahmen ausgeht, dann muss man natürlich auch zu so falschen Schlüssen kommen. Die biologische Evolution ist mit dem Hervorbringen von bewusstseinsfähigen Wesen zu Ende gegangen beziehungsweise ist jetzt nicht mehr wichtig, und was nun begonnen hat, ist eine Evolution des Bewusstseins. Der Autor wird doch kaum abstreiten, dass er intelligenter ist als zum Beispiel ein Neandertaler oder ein Affe. Aber nicht nur in Bezug auf pure Intelligenz haben wir uns weiterentwickelt, sondern auch in moralischer, emotionaler und spiritueller Hinsicht, und diese Entwicklung geht weiter.

**Dietzsch, Teltow:**
Sicher kennt die Natur kein »besser«, sie richtet sich nicht nach menschlichen Kategorien. Eigentlich kommt Fortschritt von Fortschreiten und ist mithin ein zeitlich beziehungsweise räumlich bezogener Begriff ohne qualitative Aussage – insofern also genau das, was der Autor meint, und eben nicht die gemeinhin darunter verstandene »Höherentwicklung«. Jede Veränderung, die dem Menschen (individuell oder gesellschaftlich) als Verbesserung erscheint, empfindet er als eine solche Höherentwicklung. In unserem Kopf wird die Welt nun mal immer interessenorientiert bewertet – der Drang nach Verbesserung der Lebensbedingungen ist zur Arterhaltung essenziell und folglich die Basis für die Einteilung in »gute« und »schlechte« Veränderungen der Umwelt. Das ist nicht »naiv«, sondern einfach pragmatisch. Insofern sind die Aussagen des Artikels ganz klar: Die Natur erzeugt keine Höherentwicklung, der Mensch schon.

**MMag. Manfred Gotthalmseder:**
Es ist wohl eher die krankhafte Situation universitären Wissensgewinns, mit dem Übergewicht an Zitaten, die den Eindruck machen kann, die Basis aller Erkenntnis wäre bloß Common Sense. Im Ursprung dient unser Gehirn nur einer einzigen Sache, nämlich der Voraussicht. Jede geplante Handlung basiert auf einer vorgestellten Zukunft. Und tatsächlich sind wir in Hinsicht auf unsere Fähigkeit, Zukunft abzuschätzen und planend zu handeln, heute wesentlich weiter als einst. Man denke nur, welche komplexen Pläne heute technisch >>

▷ und Rückschläge in der großen Gesamtschau letztlich doch als Fortschrittsgeschichte schreiben wollen. Schließlich geht es uns – im Durchschnitt – besser als jeder Generation zuvor, wenn man die gängigen Kriterien eines guten, gelingenden Lebens anlegen will: Gesundheit, Lebenssicherheit, Bildung, Würde. Und auch die moderne Ethik der Aufklärung gilt vielen als entwickelter als die fundamentalistischen Ethiken davor. Kurz: Der Zugang zu den Ressourcen des Glücks und der Zufriedenheit scheint gesicherter denn je.

Aber ist das wirklich so? Schließlich ist Fortschritt kein Merkmal des Evolutionsgeschehens, auch wenn im manchmal etwas lockeren Sprachgebrauch – auch unter Fachleuten – gerne von Höherentwicklung und ähnlich suggestiven Konzepten die Rede ist. »Die Evolution geht ziemlich langsam nirgendwohin«, formuliert der Biophilosoph Michael Ruse mit klarer Absage an jegliche Fortschrittsidee. Fortschritt kann es logischerweise nur geben, wenn es einen verlässlichen Maßstab gibt, an dem er zu messen wäre. Und wenn aber die Evolution als ein sich selbst organisierender Prozess verstanden werden muss, der keinem von außen angelegten Entwicklungsplan folgt, greift die Fortschrittsrhetorik ins Leere. Es wird nur allzu oft vergessen, dass Homo sapiens keineswegs als höher entwickelt gelten kann als seine Primaten-Verwandten oder gar als andere Säuger. Auch wenn die Darwin'sche Theorie von Anfang an, vor allem auch in der philosophischen und sozialwissenschaftlichen Rezeption, als Fortschrittstheorie aufgefasst wurde, erscheint es nicht gerechtfertigt, die biologischen Arten in irgendeiner Form als höher oder niedriger entwickelt ordnen zu wollen. Bestenfalls kann man die Stammesgeschichte als einen Prozess der Komplexitätszunahme beschreiben. Aber selbst dies ist nicht besonders überzeugend, denn Bioinformatiker lehren uns, dass beispielsweise das Mäusegenom nicht wesentlich weniger komplex ist als das unsere, und außerdem gibt es ja auch Fälle von regressiver Evolution, also Fälle evolutionären Komplexitätsverlusts.

Kurz: Evolution ist vielleicht Komplexitätszunahme, aber Komplexitätszunahme ist nicht Fortschritt und Fortschritt keine biologische Kategorie.

Wohl aber eine psychologische. Und deswegen gehört die Fortschrittsidee in die Klasse jener Konstruktionen, von denen zuvor schon die Rede war. Unsere Gehirne generieren wieder einmal eine Idee, für die es in der biologischen Welt außerhalb des Bewusstseins keine in irgendeinem Sinn objektive Entsprechung zu geben scheint. Der Maßstab, an dem wir Fortschritt messen, erwächst aus unseren ganz persönlichen Präferenzen, Zielen und Wünschen im Hier und Heute eines ausdifferenzierten, informierten, strategisch eigen-interessierten Gehirns. Er ist also selbst gemacht und bleibt damit untrennbar in der Welt des Subjektiven verhaftet. Und weil Menschen als »naive Realisten« auf die Welt kommen, hegen sie die Fortschrittsidee und projizieren sie in die Welt um sie herum. Damit ist die Idee des Fortschritts genauso zuverlässig wahr wie jede andere naiv-realistische Interpretation des Gehirns: Die Erde ist eine Scheibe, die Sonne geht auf, die Bäume sind grün, Autos machen Lärm. Erst mit einem distanzierten Blick von

*»Der Beitrag zeigt in schöner Deutlichkeit die subjektive Begrenztheit menschlichen Denkens, einschließlich der Soziobiologie.«*
**Gerhard Frensel**

>> umgesetzt werden können. Auch die nötige Organisation ist eine Erkenntnisleistung. Da die noch nicht reale, aber bereits vorgestellte Zukunft unser Verhalten bestimmt und dieses wiederum auf die Zukunft wirkt, kann man auch sagen, dass unsere Freiheit mit unserer Vorstellungsfähigkeit wächst. Wir können uns zahlreichere Möglichkeiten erdenken, mit Anforderungen umzugehen, als je zuvor. Wenn wir heute schon wissen, dass uns in den kommenden Jahrzehnten ein Klimawandel droht, dann ist das nur dem Fortschritt, also unserer ständig wachsenden Voraussicht zu verdanken.

**Reino Kropfgans, Wuppertal**
Innerhalb des Systems alltäglicher Selbstbehauptung ist Fortschritt nur die Möhre, die der Reiter dem Esel vor die Nase hält. Ergo ist die Fortschrittskonstruktion systemimmanent und keinesfalls kompatibel mit dem System des Absoluten. Aber genau dieser Eindruck entsteht bei der Lektüre, dass nämlich das eine »normale« Bewusstseinsuniversum gegen diesen anderen Raum abgeglichen oder gar ausgespielt werden soll.

**Gerhard Frensel, Oldenburg:**
Der Beitrag von Eckart Voland zeigt in schöner Deutlichkeit die subjektive Begrenztheit menschlichen Denkens. Dies gilt aber nicht nur für die zitierten »naiven« Fortschrittsmodelle, sondern auch für philosophische Theorien. Einzuschließen ist hier auch die Soziobiologie, die ebenfalls dem Erkenntnisdilemma verhaftet ist, etwas Unbeweisbares beweisen zu wollen.

**Alexandra Surdina, Düsseldorf:**
Von objektivem Fortschritt zu sprechen macht genauso wenig Sinn, wie von objektiver Geschwindigkeit zu reden. Es braucht zwei zeitlich verschiedene Bezugspunkte, die miteinander verglichen werden, um Bewegung festzustellen. Über Zwang zu evolutionärer Veränderung zur Überlebenssicherung sind wir hinweg. Der Mensch, der längst begonnen hat, das Leben in der Umwelt an sich selbst anzupassen, liegt im Überlebenschancen-Ranking weiter vorn als sein Versuchskaninchen Maus. Von der ohnehin langsamen Weiterentwicklung durch Evolution wird für uns wenig zu erwarten sein. Weiterentwicklungen und

außen, gleichsam von einem archimedischen Punkt aus, sind diese naiven Weltinterpretationen als Illusionen zu erkennen und entsprechend epistemisch korrigierbar.

Aber wozu das Ganze? Warum konstruiert das Gehirn die Fortschrittsidee und pflegt sie ein Leben lang (mit freilich je nach Lebensabschnitt unterschiedlicher Emphase)? Nun – die natürliche Selektion arbeitet bekanntlich über die Bewertung von Unterschieden, und aus dieser überaus simplen Tatsache folgt, dass das Darwin'sche *survival of the fittest* (»Überleben des Fittesten«) automatisch und zwangsläufig zu einem evolutionären Wettrüsten führt. Die Vorteile des einen sind nur allzu oft die Nachteile des anderen, und deshalb leben Menschen in Komparativen. Stillstand bedeutet das Ausscheiden aus dem evolutionären Spiel, und deshalb ist in der Darwin'schen Welt das »Höher, Weiter, Schneller« den Organismen notwendigerweise inhärent.

Bei bewusstseinsfähigen Organismen, wie bei uns Menschen, schlägt sich das natürlich auch in der Psyche nieder. Dazu gehört es, Unterschiede wahrzunehmen und sie gemäß möglicher Fitnesskonsequenzen zu bewerten. Aus dem simplen »Höher, Weiter, Schneller« werden im Lauf der Primatenevolution komplexe Motivationslagen mit persönlich wahrgenommenen Zielen und Absichten. Und hinsichtlich dieser Ziele kann man Erfolg haben oder scheitern. Dann gibt es also doch Fortschritt? Und er wäre zu messen an der Erfüllung persönlicher Präferenzen – oder aus soziobiologischer Sicht: an der Zunahme reproduktiver Trümpfe im *struggle for life* (»Kampf ums Dasein«)?

In den USA befragt man seit 1958 die Bevölkerung nach ihrer Lebenszufriedenheit. Interessanterweise bleibt der Anteil derjenigen, die sich als »very happy« bezeichnen, über die Jahre mit rund dreißig Prozent praktisch konstant. Weder die Erfindung der Pille und die damit einhergehende sexuelle Liberalisierung noch die zunehmende Emanzipation der ethnischen Minderheiten und die damit einhergehende Befreiung von ökonomischer, sozialer und rechtlicher Benachteiligung, weder die Entwicklungen in der medizinischen Diagnostik und Therapie noch die Zunahme an Kaufkraft und materiellem Wohlstand haben zu einer Vermehrung der Glücklichen geführt. Es wäre aber auch nicht zu erwarten gewesen, denn wie gesagt: Evolutionärer Wandel bedarf der Differenz. In dem gleichen Maß, wie ▷

neue Entdeckungen in Technologie und Wissenschaft öffnen neue Türen. Offene Türen sind eine Voraussetzung für Fortschritt, jedoch nicht mit ihm zu verwechseln. Im Fortschritt schwingt immer ein moralischer Aspekt mit, ein Bezug auf bestimmte Ziele.

**Obermair, München:**
Betrachtet man das Wort »Fortschritt«, ohne es zu bewerten, so bleibt nur das »Fortschreiten« von einem alten Zustand in einen neuen. Ob der neue Zustand tatsächlich besser ist, hängt sicherlich von der Sicht jedes Einzelnen ab. Das Prinzip des Fortschreitens gehört jedoch zur Evolution, denn Stillstand ist gleichbedeutend mit dem Tod.

**Dr. Ekkard Brewig, Overath:**
Wenn Eckart Voland die Aufgabe der »Fortschrittsillusion« so genau und überzeugend als naturnotwendig für die Population Mensch beschreiben kann, dann gibt es eine Messlatte – nämlich das Überleben in den gesellschaftlichen Bezügen. Das Wort »Illusion« gewinnt damit eine völlig andere, wissenschaftlich-objektive Qualität im Sinn eines Überlebensfaktors. Es entspricht also nicht mehr dem subjektiven, gar pathologischen Vorstellungsgebilde, welches wir gemeinhin damit verbinden.

**Heinrich van Martens:**
Der Begriff »Fortschritt« ist definiert als eine Verbesserung gegenüber bestimmten Umständen. Das bedeutet, dass evolutionärer Fortschritt die Verbesserung eines bestimmten Wesens hinsichtlich einer seiner Eigenschaften meint. Also ist »Fortschritt« kein menschliches Ermessen, sondern resultiert lediglich aus der Eigenschaft der Menschen, verschiedene Sachen zu vergleichen. Daher würde ich nicht unbedingt sagen, dass »Fortschritt« ein rein menschliches Ermessen ist, sondern vielmehr hauptsächlich eine objektive Feststellung.

**Tigris Seyfarth, München:**
In der Fokussierung auf das Gehirn als angenommenen Ort der »Erkenntnis« liegt die Blockade, der Voland wie so viele andere unterliegen. Dieses zeigt tatsächlich seit langer Zeit keine »Evolution«. Beim >>

▷ durch »fortschrittliche Maßnahmen« Differenzen eingeebnet werden, entstehen neue. Der evolutionäre Wettbewerb kennt eben keinen Stillstand. Und wie alle anderen Teilnehmer am evolutionären Spiel sind auch Menschen nicht in der Lage, ein Ende im evolutionären Wettrüsten zu verabreden. Aus naturgeschichtlichen Gründen ist ihre Psyche dazu nicht in der Lage.

In biologischer Angepasstheit an das Evolutionsgeschehen bedarf auch die menschliche Zufriedenheit der Differenz. Die menschlichen Emotionen sind evolviert, weil sie uns als Belohner oder Bestrafer durch die Opportunitäten und Fährnisse des Lebens navigieren. Positive Emotionen und Stimmungen – man nennt sie Glück, Zufriedenheit, Stolz, Lust – gehen mit einem Zugewinn an reproduktiven Ressourcen einher. Sie versprechen Fitnessgewinne, und genau deshalb erleben wir sie als belohnend.

Aber der Zugewinn an reproduktiven Ressourcen – ob Lottogewinn oder neue Liebe – ist nur im Moment der Erfüllung ein Zugewinn und wird früher oder später zum Status quo. Dieser aber verlangt, der Logik des biologischen Imperativs folgend, wiederum einen Zugewinn: Glück lässt sich eben nicht konservieren. Bereits im Moment seines Entstehens beginnt seine Verfallsgeschichte. Wer dies nicht glaubt, mag gerne die Biografien von Lottogewinnern studieren, die immer wieder lehren, dass Menschen sich überraschend schnell auf neue, vorteilhafte Situationen einstellen und sehr schnell wieder damit beginnen, die Differenzen zwischen »ist« und »könnte« zu sehen und entsprechende Wünsche, Sehnsüchte und Motive zu entwickeln. Selbst Bill Gates soll gesagt haben, was so viele sagen: »Meinen Kindern soll es einmal besser gehen als mir selbst.«

Was beschreibt eine solche Situation besser als das Bild von einem Hamsterrad? Man bewegt sich ständig, und dies mit großem Aufwand, ohne wirklich von der Stelle zu kommen. Wer sich aber je der Illusion des Fortschreitens verweigert hat, blieb zurück und gehört nicht zu den Vorfahren der nachfolgenden Generationen. Ganz offensichtlich brauchen wir die Idee des Fortschritts, nicht weil sie wirklich Fortschritt generiert, sondern allein, um im System zu bleiben. Wer, weil sein Gehirn evolutionär geformt wurde, gar nicht anders kann, als ständig nach dem Besseren zu suchen, und das Bessere am Unterschied zur momentanen Situation misst, der kann auch gar nicht anders, als die Etappen der Geschichte als weniger fortgeschritten zu interpretieren. Schließlich ähneln sie nicht der momentanen Situation, und dies umso weniger, je größer die historische Distanz ist. Wer mag schon angesichts der heutigen biologischen und kulturellen Lebenschancen im Mittelalter leben – oder auch nur in der Generation seiner Großeltern?

In dieser evolutionär gewachsenen Psychologie wird Fortschritt zwar gedacht, aber nur als strategische Konstruktion zur Motivation in der »Tretmühle des Lebens«. Der archimedische Punkt, von dem aus Fortschritt zu objektivieren wäre, ist jedoch noch nicht gefunden. Und man wird ihn auch nicht finden, weil – wie gesagt – Fortschritt der Evolution wesensfremd ist. ◁

***»In der Fokussierung auf das Gehirn als Ort der Erkenntnis liegt die Blockade, der Voland wie viele andere unterliegt.«***
**Tigris Seyfarth**

>> Menschen sind es immer noch die Muskeln, die dem Sprechen zu Grunde liegen. Dass aber die daraus abgeleitete »begriffliche« Fassung der Bedingungen der Umgebung wie auch des menschlichen Organismus keine Fortschritte gemacht hätte, wird auch Prof. Voland nicht bestreiten. Wie die Menschen ihre Umgebung begrifflich fassen, so können sie auf die Umgebung (Technik) beziehungsweise auf ihren Körper (Medizin) einwirken.

Fortschritt im Voland'schen Sinn kann es tatsächlich nicht geben, da kein Mensch sein Gehirn registrieren oder beeinflussen kann. Die Fokussierung auf das Gehirn bedeutet insofern eine »begriffliche« Sackgasse für die Menschen. Man bedenke, dass »Gehirn« und »Gott« gleiche Konstellationen beinhalten: Das eine im Menschen, der andere außerhalb, werden beiden die gleichen Funktionen zugeschrieben. Beide »steuern alles«, beide kann man nicht »registrieren« und nicht »beeinflussen«. Insofern konstituiert die Fokussierung auf das Gehirn lediglich eine neue Transzendenz – jetzt im Menschen. Das passt zur Individualisierung ohne begrifflichen Erklärungsfortschritt.

**Gerd Winkler, Berlin:**
Es war einmal, da lebte der Mensch in seiner Mitte. Wenn er nicht aufpasst, kommt er nie mehr dahin. Also – der heutige Fortschritt ist schon eine Illusion.

**Prof. Dr. H.-W. Vohr, Erkrath:**
Ich halte den Artikel schon für sehr gelungen, da er die tägliche Beobachtung widerspiegelt. Allerdings würde ich die Allgemeingültigkeit, wie sie der Autor suggeriert, nicht ganz so einfach sehen. Es besteht doch kein Zweifel darüber, dass sich das menschliche Gehirn in Jahrtausenden evolutionär weiterentwickelt hat, damit eben doch ein Fortschritt eingetreten ist. Allerdings hat zunehmend der Selektionsdruck auf Fortentwicklung des Gehirns nachgelassen. Es ist schon seit Jahrhunderten eben nicht mehr von Vorteil, besonders begabt, intelligent, kräftig zu sein oder sonstwie am äußeren Rand der Norm zu stehen. Das Gleiche gilt ebenso für die anderen Extreme. Solche besonderen Begabungen erhöhen schon lange nicht mehr die Überlebenschancen. Damit titrieren wir unsere evolutio-

# Replik des Autors

**Wenn man entscheiden will,** ob etwas eine Illusion sein könnte oder nicht, muss man logischerweise seine Perspektive verändern. Solange man in der Sicht des naiven Realisten verharrt, kann man nicht erkennen, dass es die Erde ist, die sich um die Sonne dreht. Es sind die Modelle der Kosmologie, die uns eines Besseren belehren.

Entsprechendes gilt für die menschliche Psychologie. Als naiver Realist kann man nicht erkennen, dass die Erscheinungen der Welt farblos sind. Erst die Neurobiologie erklärt, wie im Gehirn Farben entstehen und alle anderen Bedeutungen, die das ausmachen, was man das phänomenale Bewusstsein nennt. Und unser bestes Wissen von der biologischen Evolution lehrt, dass es keinen Fortschritt, sondern nur eine mehr oder weniger stetige Ausdifferenzierung der Merkmale und biologischen Arten gibt, auch wenn man als naiver Realist vehement geneigt ist, dies anders zu sehen.

Viele der Leserreaktionen auf den Essay gehen diesen Schritt nicht mit, sondern verteidigen den Fortschritt als etwas außerhalb des eigenen Bewusstseins real Vorfindliches. Diese Vorbehalte erinnern an das, was der Evolutionsforscher und Biophilosoph Ernst Mayr (1904 – 2005) wiederholt als eines der größten intellektuellen Hindernisse auf dem Weg zur Akzeptanz darwinischen Denkens bezeichnet hat, nämliche die »finale Weltanschauung«. Damit ist gemeint, dass Menschen spontan geneigt sind, Entwicklungen gerichtet, also auf ein Ziel hin zu interpretieren. Nicht zuletzt gewinnen Religionen sehr viel Attraktivität aus finalen Weltanschauungen, und auch Lamarcks Evolutionstheorie bedient diese Idee, wenn sie die Evolution mit einer den Organismen innewohnenden Tendenz zur Höherentwicklung in Beziehung bringt. Der Irrtum vom Fortschritt hat eine lange Geschichte. Und diese wirkt bis in die Gegenwart.

**Was folgt daraus?** Sicherlich nicht die Empfehlung, sich einer fatalistischen Trägheit hinzugeben und Veränderungen im persönlichen Leben oder in Kultur und Gesellschaft keinen Wert beizumessen. Nur sollte man diese Veränderungen im persönlichen Leben wie in der Geschichte als das begreifen, was sie wirklich sind, nämlich bloße Veränderungen, die als Ergebnis eine mehr oder weniger komplexe Ausdifferenzierung der individuellen Lebensvollzüge und in der Gesamtschau eine Kulturgeschichte hervorbringen.

Es ist letztlich eine Frage der intellektuellen Redlichkeit, so lange nicht von Fortschritt zu sprechen, wie nicht angegeben werden kann, woran er zu messen sein könnte. Und es ist nun mal so: Das Leben auf diesem Planeten kennt kein Ziel und somit keinen Fortschritt – nur ein Bewusstsein, das aus den dargelegten Gründen die Fortschrittsidee pflegt.


**Eckart Voland** ist Professor für Philosophie der Biowissenschaften am Zentrum für Philosophie und Grundlagen der Wissenschaft der Universität Gießen.

AUTOR


Weiteres zum Thema finden Sie unter www.spektrum.de/voland.

nären Möglichkeiten auf ein Mittelmaß. Und genau das ist, worum es in dem Artikel geht. Der evolutionäre Fortschritt bleibt tatsächlich aus, weil der Selektionsdruck ausbleibt.

**Carlo Gradl, Prag:**
Man muss kein Wissenschaftler sein, um den angeblichen »Fortschritt« unserer Leistungsgesellschaften als Illusion zu entlarven. Vor noch nicht allzu langer Zeit haben wir alle unser Brot selbst backen müssen, heute gilt gerade dies wieder als schick, obwohl teurer. … Also ein eindeutiges Ja zum Artikel. Fortschritt ist wohl eher die Ausreizung des jeweils technisch Machbaren in jeder Epoche. Ob er »gut« oder »schlecht« ist, hängt nur von der Bedeutung ab, welche ihm die Individuen geben.

**Dr. Peter Altreuther, Wuppertal:**
An den Faust könnte man sich schon erinnert fühlen – »… und wie wir's doch zuletzt so herrlich weit gebracht«, so sagt es Fausts Assistent Wagner, und Faust quittiert bissig: »Ja weit, bis an die Sterne weit …« – und den Fortschrittsglauben damit zur Seite legen. »Die Erfahrungen dieses Jahrhunderts sind eigentlich schrecklich genug, um den Fortschrittsglauben zu diskreditieren« (V. Hösle, Moral und Politik) – ohne ihn gleich grundsätzlich zu diskreditieren als bloße Marotte der Evolution. Dass es Fortschritt nicht gäbe, weil man ihn nicht messen könne, greift zu kurz. Natürlich müsste man die Parameter kennen, an denen Fortschritt zu messen wäre; am Beispiel der Lebensverlängerung durch die Fortschritte der Medizin erschiene das einfach – oder auch nicht? Vielleicht könnte Ernst Bloch helfen: »Klar bleibt, der Ruf nach vorwärts ist so wenig mit sich selber fertig wie die Sache, die er bedeutet. Der Begriff Fortschritt impliziert ein Wohin und Wozu, und zwar ein zu Wollendes, also gutes Wozu, und ein zu erkämpfendes, also noch nicht Erreicht-Vorhandenes. Ohne Wohin und Wozu ist ein Fortschritt überhaupt nicht denkbar, an keinem Punkte messbar, vor allem auch als Sache gar nicht vorhanden.« Wohin und wozu – Fortschritt nicht in der Vergangenheit, sondern in der Zukunft, nicht für das Tretrad, aber zum Wohle von Menschen. Frieden wäre so ein Ziel und ein ungeheurer Fortschritt.

# Gegenwind aus dem Schwarzen Loch

Kleiner als unser Sonnensystem, prägen sie dennoch das Schicksal riesiger Galaxienhaufen, in deren Zentren sie sitzen: Durch gewaltige Teilchenwinde behindern die kosmischen Mahlströme neue Sterngeburten

DON DIXON

WEITERE THEMEN IM MAI

## Mein Leben auf Festplatte

Wie wäre das, wenn alles, was ich lese, schreibe, sehe, höre und sage, abgespeichert würde – mit Suchfunktion zum Wiederfinden?

## Laser mit Silizium

Der Bau des ersten Siliziumlasers ermöglicht preiswerte Halbleiterchips, die mit Elektronen und Licht zugleich rechnen

KENN BROWN

## Treibhausgas aus Pflanzen

Die überraschende Entdeckung, dass auch Pflanzen Methan abgeben, stößt die Emissionsbilanz dieses Treibhausgases um. Am Klimawandel ist die Vegetation dennoch unschuldig

**Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?**

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

**www.spektrum.com/newsletter**

AKG BERLIN

SCHWERPUNKT

## Das wahre Gallien

Caesar kam, sah und erfand ein Reich voller Barbaren, das es im Namen Roms zu unterwerfen galt. Wer aber waren die Gallier wirklich?

Dieser Artikel ist als 'Plus'-Artikel zur Ausgabe
» Spektrum der Wissenschaft, April 2007
nur Abonnenten der Zeitschrift zugänglich
präsentiert von www.mag-heaven.dl.am

# Eindämmung des Kohlendioxids

Dem Anstieg der Treibhausgase Einhalt zu gebieten ist ein gigantisches Unterfangen – aber machbar. Die Technologien dazu gibt es bereits. Nur dürfen wir keine Zeit verlieren.

Von Robert H. Socolow und Stephen W. Pacala

Zurückweichende Gletscher, katastrophale Wirbelstürme, heißere Sommer, hungernde Eisbären: Die bedrohlichen Vorboten der globalen Erwärmung sind unübersehbar, und sie fordern von Unternehmen und Regierungen eine beispiellose Abkehr von historischen Verhaltensweisen. Seit zwei Jahrhunderten bringen die Menschen Jahr um Jahr größere Mengen von Kohlenstoff in die Atmosphäre ein, der bis dahin unter der Erdoberfläche gebunden war. Gegenwärtig werden pro Jahr um die 7 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Form von Kohle, Erdöl und Erdgas gefördert, und die Gesellschaft verbrennt nahezu alles davon, wobei Kohlendioxid ($CO_2$) freigesetzt wird.

Seit dem Beginn der industriellen Revolution im 18. Jahrhundert steigt der $CO_2$-Gehalt in der Atmosphäre in beispiellosem Tempo. Ab einer gewissen Konzentration werden die Folgen unserer Aktivitäten nicht nur bedrohlich sein, sondern ins Katastrophale umschlagen. Dann ist mit irreversiblen Klimaveränderungen wie dem Verschwinden der Eisdecke auf Grönland zu rechnen. Dieser schwer zu bestimmende Schwellenwert liegt mit großer Wahrscheinlichkeit beim Doppelten der vorindustriellen Konzentration – eher darunter. In jedem Fall erscheint eine Begrenzung auf diesen doppelten Wert ein erstrebenswertes Ziel. Vor zwei Jahren haben wir beide ein einfaches Rahmenprogramm zur Erreichung dieses Ziels erarbeitet.

Dabei haben wir zwei Szenarien für die nächsten fünfzig Jahre einander gegenübergestellt. In dem einen (dem »Business-as-usual-Szenario«) wächst die jährliche Emissionsrate weiter im Tempo der letzten dreißig Jahre bis auf etwa 14 Milliarden Tonnen $CO_2$ im Jahr 2056. Selbst wenn man ab diesem Zeitpunkt beginnen würde, die Weltenergieversorgung völlig von der Kohlenstoffverbrennung abzukoppeln – was gewaltige Anstrengungen und vielleicht hundert weitere Jahre Zeit erfordern würde –, wäre eine Verdreifachung der vorindustriellen $CO_2$-Konzentration kaum zu vermeiden. Dagegen bleibt im »Emissionsstopp-Szenario« der Ausstoß die nächsten fünfzig Jahre auf dem heutigen Stand von 7 Milliarden Tonnen pro Jahr und wird in den folgenden fünfzig Jahren (bis 2106) auf die Hälfte reduziert. Auf diese Weise kann eine Verdopplung des atmosphärischen $CO_2$-Gehalts abgewendet werden. Zwischen diesen beiden Extremszenarien spannt sich ein Fächer von Optionen auf (Kasten S. 5).

Wie soll es möglich sein, die weltweiten Emissionen konstant zu halten, während die Weltwirtschaft wächst? Diese Aufgabe ist nicht so unlösbar, wie es auf den ersten Blick scheint. Es gibt nämlich keine starre Kopplung zwischen wirtschaftlicher Aktivität und Energieverbrauch oder zwischen Letzterem und der Verbrennung von Kohlenstoff. Über die letzten 30 Jahre ist das Bruttosozialprodukt aller Länder der Welt um knapp 3 Prozent pro Jahr gewachsen, die $CO_2$-Emissionen aber nur halb so schnell. Die

Die Menschheit hat die Wahl zwischen einer Zukunft ohne Begrenzung der Emissionen, was eine schwere Bedrohung des Klimas nach sich zieht (links), und einer aktiven Kontrolle, die sowohl Kosten als auch Nutzen bringt (rechts).

Kohlenstoffintensität der Wirtschaft, das heißt die Menge an ausgestoßenem $CO_2$ pro erwirtschaftetem Dollar, ist also um 1,5 Prozent pro Jahr gesunken. Wenn diese Verhältniszahl nicht nur halb so schnell, sondern genau so schnell sinkt, wie die Weltwirtschaft wächst, dann ist das Ziel »Nullwachstum an Emissionen« erreicht.

Es gibt zwei langfristige Trends, die eine Entwicklung in diese Richtung begünstigt haben und das auch weiterhin tun werden. Erstens wächst in reicher werdenden Gesellschaften der Dienstleistungssektor (Bildung, Gesundheit, Freizeit, Geldgeschäfte und so weiter) auf Kosten des energieintensiven Produktionssektors, zum Beispiel der Stahlindustrie. Zweitens arbeitet der technische Fortschritt ganz allgemein in Richtung eines geringeren Energieverbrauchs bei gleich bleibender Leistung.

Hunderte von Kraftwerken werden gar nicht erst gebaut, weil die Welt in viel sparsamere Kühlschränke, Klimaanlagen und Motoren investiert hat, als es sie noch vor zwanzig Jahren zu kaufen gab. Hunderte von Öl- und Gasfeldern wurden langsamer erschlossen als geplant, weil Flugzeugmotoren weniger Kraftstoff verbrauchen und die Fenster in modernen Neubauten weniger Wärme nach außen durchlassen. Das Ziel konstanter Emissionen ist überhaupt nur erreichbar, weil die Menschen sich 2056 mit Fahrzeugen bewegen werden, die noch nicht entwickelt sind, die Häuser, die sie nutzen werden, noch ungebaut, und ihre Wohnorte, deren Lage ihr Verkehrsverhalten bestimmt, ebenso wie die Kraftwerke zu ihrer Versorgung noch ungeplant sind. Das gegenwärtige ineffiziente Versorgungssystem hat noch viele ungenutzte Reserven.

Gleichwohl bleibt das Vorhaben gigantisch. Das Dreieck, das sich zwischen den beiden genannten Szenarien auftut (Kasten S. 5), ist entmutigend groß: Beginnend mit dem Status quo von heute soll Jahr für Jahr eine größere Menge an Kohlendioxid, die ansonsten in die Luft geblasen würde, eingespart werden, bis hin zu im Wortsinn atemberaubenden 7 Milliarden Tonnen im Jahr 2056. Die Vorstellung, man könne ein Problem dieser Größe mit einer einzigen genialen Erfindung erledigen, ist völlig utopisch. Dagegen sind einzelne Maßnahmen, deren jede ein Siebtel dieser Einsparung beisteuert, allmählich ansteigend bis auf je eine Milliarde Tonnen im Jahr 2056, durchaus realisierbar. Man zerlegt also das große Dreieck in sieben schmale »Keile«, die jeder ein erreichbares Ziel darstellen.

Ein Beispiel: Ein heutiges amerikanisches Durchschnittsauto fährt 16 000 Kilometer pro Jahr, verbraucht 7,6 Liter auf 100 Kilometer und emittiert damit nahezu eine Tonne $CO_2$ jährlich. Verkehrsexperten sagen voraus, dass in fünfzig Jahren zwei Milliarden Autos weltweit mit ungefähr derselben Fahrleistung pro Jahr unterwegs sein werden. Falls der Durchschnittsverbrauch dann immer noch 7,6 Liter auf 100 Kilometer betragen sollte, würden ihre Auspuffrohre zusammen zwei Milliarden Tonnen $CO_2$ jährlich in die Luft pusten. Wenn dagegen der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch auf die Hälfte sinkt, ist bereits eine Milliarde Tonnen gespart. Das Vierliterauto – das heute schon technisch möglich ist – würde also bereits einen der sieben Keile einbringen.

## Bitte keine Luftschlösser

Aber Vorsicht! Wir dürfen nicht aus Versehen Maßnahmen doppelt zählen. Bereits im Business-as-usual-Szenario steckt ja – in Fortschreibung vergangener Trends – ein gewisser technischer Fortschritt mitsamt abfallender Kohlenstoffintensität. Auch in der Vergangenheit ist ganz ohne Rücksicht auf das Klima der Kraftstoffverbrauch gesunken, weil das technisch möglich war und dem Kunden etwas einbrachte. Das wird auch in Zukunft so sein (und das Anwachsen der Anzahl an Autos wird diesen Einspareffekt weiterhin zunichte machen). Als klimawirksam können wir nur eine Maßnahme zählen, die über den ohnehin stattfindenden technischen Fortschritt hinaus durch kohlenstoffpolitische Ziele motiviert ist.

Darüber hinaus darf man nur Innovationen berücksichtigen, die bereits heute irgendwo auf der Welt ihren Markt gefunden haben – wenn auch vielleicht nicht in der erforderlichen Größenordnung. Luftschlösser sind nicht zulässig. Uns geht es bei dem Konzept der Keile um ein pragmatisches und realistisches Emissionsstopp-Szenario, einen Arbeitsplan, der nicht darauf angewiesen ist, dass uns in den nächsten zwanzig Jahren eine Wunderwaffe in den Sinn kommt. Wir behaupten allerdings, dass es selbst un- ▷

BEIDE BILDER: KENN BROWN

## In Kürze

▶ Wenn die Menschheit mehr als eine gewisse Menge **Kohlendioxid in die Atmosphäre** einbringt, gerät das Weltklima in einen Zustand, den es in der jüngeren geologischen Geschichte der Erde nicht gegeben hat, mit **unabsehbaren Folgen**.

▶ Die Klimatologen sehen diese **Schwelle zur Klimakatastrophe** typischerweise bei einem $CO_2$-Gehalt in der Atmosphäre, der dem Doppelten des vorindustriellen Werts entspricht.

▶ **Eine gigantische Reduktion des $CO_2$-Ausstoßes** gegenüber den bei Fortschreibung der bisherigen Entwicklung zu erwartenden Werten ist geboten. Diese Schwindel erregende Aufgabe bekommt eine praktikable Größenordnung, indem man sie in **Teilaufgaben (»Keile«)** zerlegt, deren jede mit heutigen technischen Mitteln lösbar ist.

▷ ter diesen vorsichtigen Annahmen möglich ist, sieben Keile einzuschlagen, und dass dabei sogar eine gewisse Auswahl zur Verfügung steht (Kasten S. 6). Eine Kooperation im Weltmaßstab wird erforderlich sein; aber in deren Rahmen werden einzelne Länder sich ein Sortiment an Keilen nach ihren wirtschaftlichen Möglichkeiten, ihren natürlichen Gegebenheiten und ihren politischen Vorlieben zusammenstellen können.

Wohlgemerkt: Auch wenn die Mittel zur Erreichung unserer Ziele im Prinzip schon zur Verfügung stehen, werden weitere Anstrengungen erforderlich sein, um diese Techniken im globalen Maßstab anzuwenden und dabei deren Kosten und unerwünschte Nebeneffekte in Grenzen zu halten. Gleichwohl halten wir es nicht nur für wünschenswert, sondern auch für machbar, die $CO_2$-Emissionen bis 2056 auf dem heutigen Niveau zu halten, ohne das Wirtschaftswachstum abzuwürgen.

**Wir brauchen keine Wunderwaffe, um die Klimakatastrophe abzuwenden, sondern viele kleine Maßnahmen. Und selbst dabei haben wir noch eine gewisse Auswahl**

Ganz oben auf der Prioritätenliste steht die Abschaffung der konventionellen Kohlekraftwerke. Dieser fossile Energieträger wird neuerdings wieder verstärkt zur Strom- und Kraftstofferzeugung herangezogen, weil seine Konkurrenten Öl und Gas im Preis gestiegen und mit politischen Unsicherheiten belastet sind. Für die Umwelt ist das schlecht, denn ein mit Kohle befeuertes Kraftwerk bläst pro erzeugter Kilowattstunde doppelt so viel $CO_2$ in die Luft wie ein erdgasbetriebenes.

Wenn keine klimapolitischen Regeln greifen, könnten die Energieversorger der Welt in den nächsten fünfzig Jahren ohne weiteres einige tausend Kohlekraftwerke mit je 1000 Megawatt Leistung errichten und für den Strom Abnehmer finden. 700 von ihnen nicht zu betreiben – und gar nicht erst zu bauen – würde so viel $CO_2$ einsparen, wie einem Keil entspricht. Aber darüber muss jetzt entschieden werden. In Deutschland steht nach einer Studie des Verbands der Elektrotechnik (VDE) bis 2020 die Hälfte der zurzeit installierten Kraftwerksleistung zur Erneuerung an, aus Altersgründen und wegen der Laufzeitbegrenzung für die Kernkraftwerke. Und Kraftwerke sind langlebig: Eine Anlage, die in diesem Jahrzehnt errichtet wird, hat alle Chancen, noch in fünfzig Jahren die Atmosphäre zu belasten.

Die naheliegendste Alternative für Kohlestrom ist, diesen Strom gar nicht zu verbrauchen (siehe SdW Spezial 1/2007, S. 64). Von den 14 Milliarden Tonnen $CO_2$-Emissionen, die im Business-as-usual-Szenario für 2056 prognostiziert werden, entfallen wahrscheinlich 6 Milliarden auf die Stromerzeugung, größtenteils aus Kohle. Wohn- und Geschäftsgebäude verbrauchen heute 60 Prozent der weltweit produzierten Elektrizität (70 Prozent in den USA) und werden das in ungefähr dieser Größenordnung auch in Zukunft tun. Energie sparende Lampen und Geräte würden diesen Verbrauch auf die Hälfte senken, was zwei Keile ausmacht. Einen weiteren Keil könnte die Industrie durch effizientere Nutzung elektrischer Energie beitragen.

Aber selbst wenn die letzte konventionelle Glühbirne zu Gunsten ihrer sparsameren Nachfolgerin auf dem Müll gelandet ist, werden auf der Welt noch Kraftwerke gebraucht. Die könnten sogar Kohle verheizen – sofern sie ihr $CO_2$ abfangen und unterirdisch verpressen, wie ich (Socolow) in SdW 3/2006, S. 72, dargestellt habe (siehe auch den Beitrag in SdW Spezial 1/2007, S. 22). Die heutigen hohen Ölpreise begünstigen den Wechsel zu dieser Technik, da Mineralölfirmen häufig bereit sind, große Mengen an $CO_2$ einzukaufen und in ihre Ölfelder zu pumpen, um durch den so erzeugten Druck mehr fördern zu können. Für einen Keil müssten 800 große Kohlekraftwerke mit dieser Technik ausgestattet werden, wodurch nahezu alles von ihnen erzeugte $CO_2$ von der Atmosphäre ferngehalten würde. Auf diese Weise können sogar in einer $CO_2$-reglementierten Welt Kohlebergbau und Kohlekraftwerke in Betrieb bleiben. Die großen Erdgaskraftwerke der Zukunft würden auf dieselbe Weise ungefähr einen Keil beisteuern.

Auch die erneuerbaren Energien können ihren Teil beitragen. Die von der Sonne eingestrahlte Energie ist direkt in Photovoltaikzellen, in Sonnenkollektoren und in mit Sonnenwärme betriebenen Kraftwerken nutzbar oder indirekt in Form von Wasser- und Windkraft. Dass Wind und Sonne nicht rund um die Uhr verfügbar sind, mindert ihren Beitrag zum Klimaschutz nicht wesentlich: Erstens können Energiespeicher die Unregelmäßigkeiten in der Leistung der Sonnen- und Windkraftwerke teilweise ausgleichen; und zweitens erzeugt auch ein konventionelles Kraftwerk, das die verbleibenden Lücken füllt, immer noch weniger $CO_2$, als wenn es im Dauerbetrieb läuft. Streng genommen nicht erneuerbar, aber für gewöhnlich in dieser Klasse mitgeführt, ist die geothermische Energie, die durch Nutzung der Wärme im Erdinneren gewonnen wird. Die 300 geothermischen Kraftwerke, die es derzeit in der Welt gibt, sind grundlastfähig, da sie eine konstant fließende Quelle anzapfen.

Die Nutzung dieser Energiequellen kann im Prinzip so massiv ausgebaut werden, dass jede von ihnen einen Keil liefert. Allerdings hüte man sich vor überoptimistischen Doppelzählungen.

Schließlich kann jedes Kohlekraftwerk nur einmal abgeschafft werden – oder ungebaut bleiben.

Die wahrscheinlich kontroverseste Eindämmungsstrategie ist die Kernkraft. Fünfmal so viele Atomkraftwerke wie heute an Stelle von Kohlekraftwerken derselben Leistung würden zwei Keile ausmachen. Alle heute am Netz befindlichen Atomkraftwerke stillzulegen und durch moderne Kohlekraftwerke ohne $CO_2$-Verpressung zu ersetzen würde einen halben Keil kosten. Ob es mit der Kernkraft auf- oder abwärts geht, hängt davon ab, ob die Regierungen einen politischen Weg zur Entsorgung des Atommülls finden und ob es gelingt, die Anlagen ohne schwere Störfälle oder Schlimmeres zu betreiben. Dabei sitzen alle Kraftwerke in einem Boot: Ein Zwischenfall wie der im schwedischen Forsmark im Juli vergangenen Jahres lässt die Debatte um die Sicherheit der Atomenergie sofort wieder aufflammen. Darüber hinaus werden strenge Regeln zur Verhinderung der militärischen Nutzung von entscheidender Bedeutung sein. Diese müssen international einheitlich gelten, um den bösen Anschein der Doppelmoral zu meiden, der lange Zeit klammheimliche Aktivitäten angespornt hat.

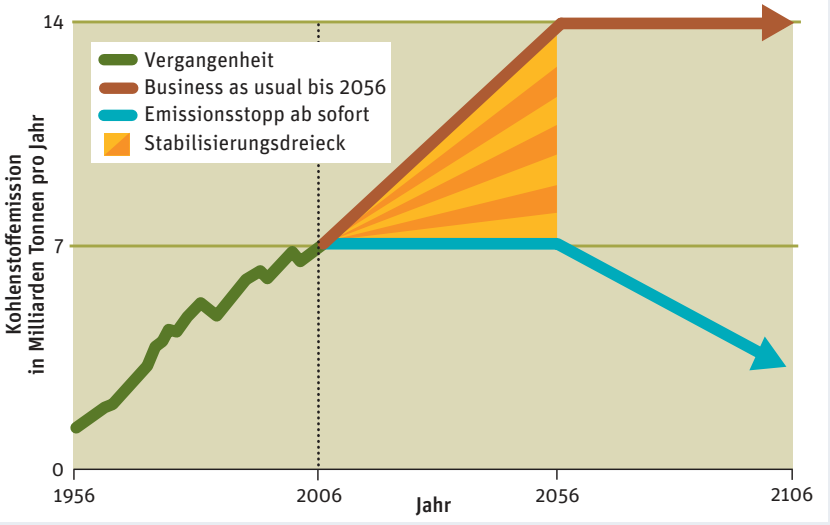
Die Eindämmung des Kohlendioxids kann sich nicht auf den Sektor der Stromerzeugung beschränken. Von den weltweiten Emissionen aus fossilen Brennstoffen im Jahr 2002 entfielen 43 Prozent auf Erdöl, 37 Prozent auf Kohle und der Rest auf Erdgas. Mehr als die Hälfte des Erdöls wurde dabei im Verkehr verbraucht. Dessen $CO_2$-Bilanz muss also ebenfalls verbessert werden. Dafür gibt es, wie bei der Stromerzeugung, im Prinzip drei Wege. Jeder von ihnen ist für einen Keil gut: reduzierter Verbrauch, verbesserter Wirkungsgrad und Energiequellen mit geringerer $CO_2$-Emission. Viele Autofahrten lassen sich durch Telearbeit statt Pendeln ins Büro ganz vermeiden, andere mit sparsamen Fahrzeugen und verringerter $CO_2$-Emission unternehmen. Der Treibstoff wäre dann ein Pro- ▷

## Wie das Klimaproblem bewältigt werden kann

Bei der gegenwärtigen Wachstumsrate wird sich die jährliche Emission von $CO_2$ in die Atmosphäre bis zum Jahr 2056 verdoppeln (Grafik links). Selbst wenn es danach gelingen sollte, sie auf diesem Niveau zu halten, wird die atmosphärische Konzentration des Gases auf mehr als 560 ppm (Millionstel) ansteigen (Grafik rechts unten), was nach herrschender Auffassung dramatische Klimaveränderungen auslösen würde. Wenn die Welt allerdings bereits heute die Emissionen auf das gegenwärtige Niveau begrenzt und nach fünfzig Jahren allmählich absenkt, sollte die $CO_2$-Konzentration deutlich unter 560 ppm bleiben.

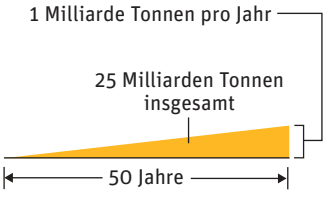
### Jährliche Emissionen

Die dreieckige Fläche zwischen den Emissionskurven (das »Stabilisierungsdreieck«) entspricht der Gesamteinsparung, die durch Techniken zum Klimaschutz in den nächsten fünfzig Jahren erzielt werden muss.



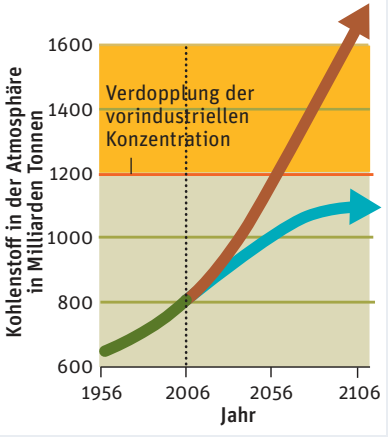

### Keile

Das Stabilisierungsdreieck kann in sieben kleinere Dreiecke (»Keile«) zerlegt werden. Jeder Keil entspricht einer Einsparung, die von null heute linear bis auf eine Milliarde Tonnen im Jahr 2056 zunimmt. Das sind insgesamt 25 Milliarden Tonnen. Ein Keil erscheint durch eine einzelne Technologie in dieser Größenordnung und in diesem Zeitrahmen realisierbar. Viele solche Techniken sind denkbar; es genügt, wenn sieben von ihnen erfolgreich genutzt werden.




### Kumulation in der Atmosphäre

Ein ppm Kohlendioxid in der gesamten Erdatmosphäre sind insgesamt 2,1 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Der Schwellenwert von 560 ppm entspricht damit 1200 Milliarden Tonnen, von denen 800 Milliarden heute bereits in der Atmosphäre sind. Bis zum Erreichen der Schwelle wären es also noch 400 Milliarden. Man dürfte etwa die doppelte Menge in die Atmosphäre blasen, denn ungefähr die Hälfte des emittierten Kohlendioxids wird von den Ozeanen und Wäldern absorbiert. Die beiden Konzentrationskurven in der Grafik unten entsprechen den Emissionskurven in der Grafik links.

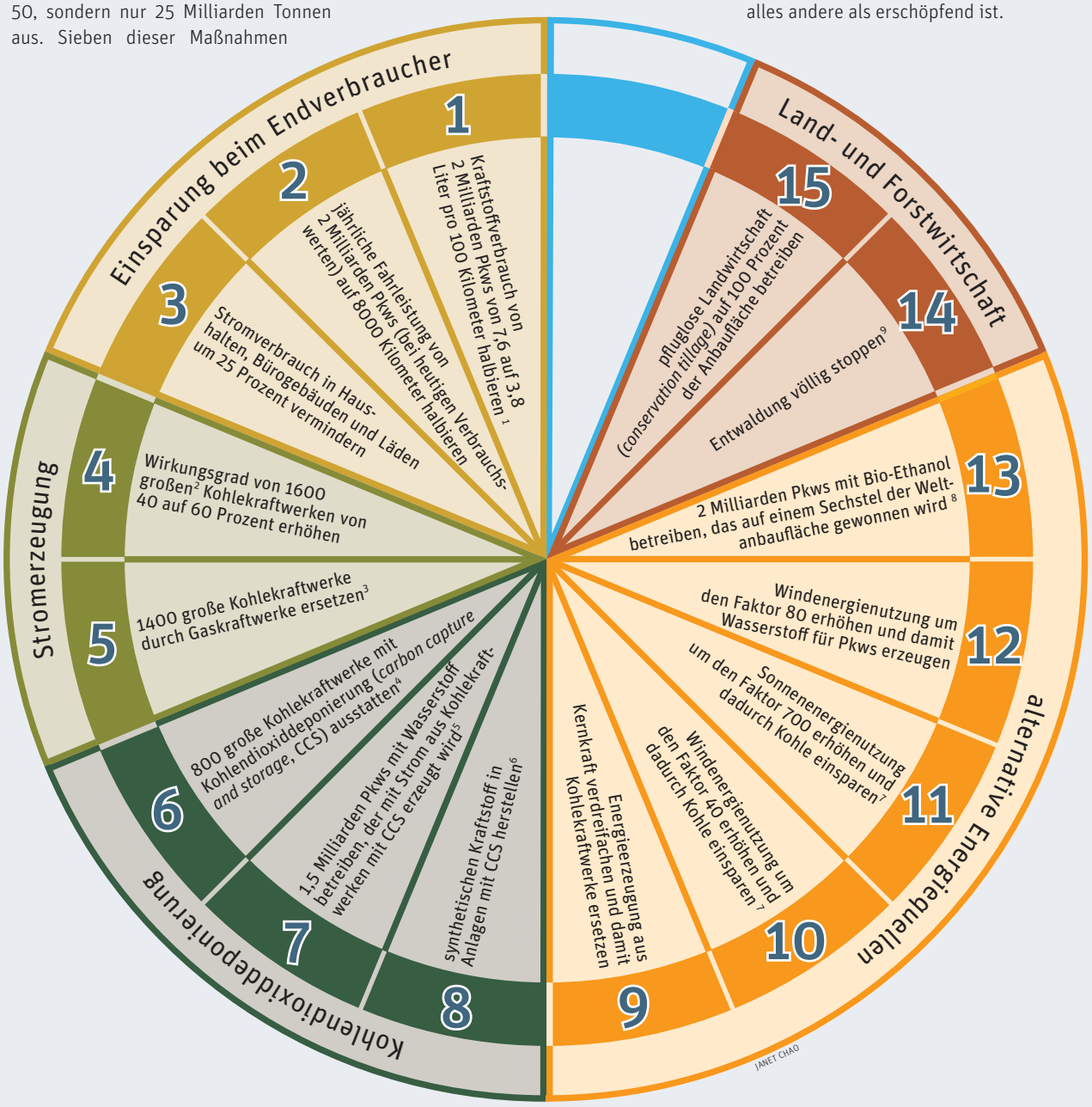


▷ dukt aus Ernterückständen oder eigens dafür angebauten Energiepflanzen, die das bei ihrer Verbrennung freiwerdende $CO_2$ beim Wachstum gebunden haben; oder das Auto fährt, direkt aus Batterien oder indirekt über elektrolytisch hergestellten Wasserstoff, mit elektrischem Strom, der seinerseits – nach einem der oben genannten Verfahren – ohne große $CO_2$-Belastung erzeugt wird.

Es ist allerdings zu befürchten, dass die $CO_2$-Intensität des Verkehrs sogar zu- statt abnehmen wird, und zwar im Namen der Versorgungssicherheit. Um die politisch problematische Abhängigkeit vom Erdöl zu verringern und Preissteigerungen auszuweichen, plant man verstärkt Kraftstoffe aus Kohle statt aus Erdöl herzustellen. Das ist eine entschieden klimaschädliche Strategie. Ein mit synthetischem Kraftstoff betriebenes

## Ein Sortiment von fünfzehn Keilen

**Jede der aufgeführten fünfzehn Massnahmen** hat das Potenzial, Kohlendioxidemissionen in einer Menge zu vermeiden, die von null beginnend in fünfzig Jahren auf eine Milliarde Tonnen Kohlenstoff anwächst. Über die fünfzig Jahre kumuliert macht jede der Einsparungen wegen dieses allmählichen Anwachsens nicht 50, sondern nur 25 Milliarden Tonnen aus. Sieben dieser Maßnahmen würden genügen, um trotz wachsender Weltwirtschaft die globalen $CO_2$-Emissionen auf dem heutigen Stand zu halten; einige mehr werden erforderlich sein, da gewisse Einsparungen auch im Business-as-usual-Szenario realisiert werden und hier nicht nochmals gezählt werden dürfen. Der leere Keil deutet an, dass die Liste alles andere als erschöpfend ist.



Fahrzeug emittiert zwar auch nur so viel $CO_2$ wie ein benzinbetriebenes Auto, aber die Herstellung aus Kohle setzt weit mehr $CO_2$ frei als das Raffinieren von Benzin aus Rohöl – genug, um die Emissionen pro gefahrenen Kilometer zu verdoppeln! Immerhin könnte man das Kohlendioxid, das bei der Synthese anfällt, deponieren und damit die klimaschädlichen Wirkungen dieser Umstellung neutralisieren.

Nicht alle Eindämmungsstrategien sind hochtechnischer Natur, und nicht alle betreffen den Energiesektor. Das schlichte, überall auf der Welt praktizierte Umpflügen von Ackerland setzt große Mengen $CO_2$ aus den oberen Bodenschichten frei. Alternative Verfahren, die unter den Namen *no-till farming* (»pfluglose Landwirtschaft«) und *conservation tillage* diskutiert werden, erfordern genaues Eingehen auf die lokalen Bodeneigenschaften und in manchen Fällen verstärkten Einsatz von Herbiziden, sind aber mitunter sogar für den Landwirt attraktiv, weil er den Aufwand für die Bodenbearbeitung spart und die Pflanzen die Zersetzungsprodukte der Ernteüberreste, die auf dem Feld liegen bleiben, nutzen können. Falls alle Bauern auf der Welt zu dieser Wirtschaftsweise übergingen, würden sie einen Keil beisteuern.

Der Unterschied zwischen der weltweiten Abholzung mit der gegenwärtigen Rate und einer Erhaltung der heutigen Waldgröße – durch Stopp des Holzeinschlags und/oder kompensierende Wiederaufforstung – würde zwei Keile ausmachen. Die Verminderung von Methanemissionen, die bereits heute halb so viel zum Treibhauseffekt beitragen wie das $CO_2$, weil atmosphärisches Methan um ein Vielfaches klimaschädlicher ist als Kohlendioxid, könnte mehr als einen Keil einbringen. Leider sind dafür die biologischen Prozesse, die in Kuhmägen, Reisfeldern und bewässertem Land Methan produzieren, noch nicht hinreichend genau bekannt.

Schließlich ist der Mensch selbst, von Natur aus und als Konsument fossiler Energie, ein $CO_2$-Erzeuger. Wenn die Weltbevölkerung in fünfzig Jahren nur auf acht statt der erwarteten neun Milliarden Menschen anwächst, macht das ebenfalls einen Keil aus.

## Politische Durchsetzung

Durch welche politischen Maßnahmen sind sieben Keile zu realisieren, und welche Auswahl unter den denkbaren Keilen (Grafik links) wird es sein?

Die dramatischen Umwälzungen, die wir im Bereich fossiler Brennstoffe für geboten halten, werden nur in Gang kommen, wenn politische Institutionen $CO_2$-Emissionen jetzt und für die absehbare Zukunft so teuer machen, dass alle Beteiligten sich in ihren Entscheidungen daran orientieren. Wenn eine Tonne emittierten Kohlenstoffs 100 bis 200 Dollar kostet, ist es für den Betreiber eines Kohlekraftwerks günstiger, das $CO_2$ unterirdisch zu verpressen, als es in die Luft zu blasen. Der Preis kann in dem Maß sinken, wie das Deponieren sich durch die üblichen Lerneffekte bei der Einführung einer neuen Technik verbilligt.

Es stellt sich heraus, dass die genannte Preisspanne in einem durchaus vernünftigen Rahmen liegt. Im 2005 eingeführten Emissionshandel der Europäischen Union wurden für das Recht, eine Tonne Kohlendioxid zu emittieren, bis zu 30 Euro bezahlt. Wer über seine – zugeteilten oder erworbenen – Rechte hinaus $CO_2$ emittiert, muss dafür eine Strafgebühr von 40 Euro zahlen. Da 3,7 Tonnen $CO_2$ eine Tonne Kohlenstoff enthalten, entspricht das einem Preis von ungefähr 150 Euro (190 Dollar) pro Tonne Kohlenstoff. Dass zurzeit (März 2007) der Preis für die Tonne $CO_2$ auf 1,10 Euro eingebrochen ist, belegt nur, dass die Emissionsrechte für die Handelsperiode von 2005 bis 2007 zu großzügig zugeteilt wurden und daher nicht wirklich knapp sind. Die Preise für die zweite Handelsperiode von 2008 bis 2012 bewegen sich in der Größenordnung von 15 Euro pro Tonne.

Nach dem amerikanischen »Energy Policy Act« von 2005 werden Neubauten von emissionsarmen Kraftwerken, sei es mit erneuerbaren Energien oder mit Kernkraft, steuerlich subventioniert. Der dadurch erzeugte Wettbewerbsvorteil gegenüber fossile Brennstoffe verfeuernden Kraftwerken liegt in der Größenordnung von 100 Dollar pro Tonne Kohlenstoff. Gleiches gilt für die Subventionierung von Bio-Ethanol, das in zunehmendem Ausmaß dem Benzin beigemischt werden soll. Ein Emissionspreis von 100 Dollar pro Tonne Kohlenstoff entspricht 12 Dollar pro Barrel Öl und 60 Dollar pro Tonne Kohle. Für den Endverbraucher würde das auf 6 Eurocent pro Liter Benzin und 1,5 Eurocent pro Kilowattstunde Strom hinauslaufen.

Zur Peitsche des Emissionspreises sollte Zuckerbrot hinzukommen. Die Kommerzialisierung von kohlenstoffarmen Technologien wie Windkraft, Photovoltaik und Hybridautos sollte den Regierungen eine Subvention wert sein, weil sich dadurch die Anzahl wettbe- ▷

Fußnoten:

[1] ▶ für 2056 geschätzter Weltbestand an Pkws 2 Milliarden mit einer durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von 16 000 Kilometern

[2] ▶ 1000 Megawatt (1 Gigawatt) bei 90 Prozent Auslastung

[3] ▶ Hier und im Folgenden wird für Kohlekraftwerke 50 Prozent Wirkungsgrad und 90 Prozent Auslastung unterstellt. Die gegenwärtige Stromproduktion aller Kohlekraftwerke der Welt entspricht 800 Kraftwerken mit diesen Eigenschaften.

[4] ▶ unter der Annahme, dass 90 Prozent des erzeugten $CO_2$ deponiert wird

[5] ▶ Bei einer Fahrleistung von 16 000 Kilometern im Jahr und einer Energieeffizienz entsprechend 3,8 Litern pro 100 Kilometer würde ein Pkw 170 Kilogramm Wasserstoff im Jahr verbrauchen.

[6] ▶ Tagesproduktion 30 Millionen Barrel, entsprechend einem Drittel der Welt-Erdölproduktion; die Hälfte des eingesetzten Kohlenstoffs geht in den Kraftstoff ein, die andere Hälfte wird deponiert.

[7] ▶ Annahme: Solar- und Windkraftwerke liefern im zeitlichen Mittel ein Drittel ihrer Maximalleistung, würden bei einer Nennleistung von zusammen 2100 Gigawatt also 700 Gigawatt Kohlekraftwerksleistung einsparen; Kohlekraftwerke mit 2100 Gigawatt Maximalleistung würden die Lücke füllen, indem sie im zeitlichen Mittel nur mit zwei Drittel Auslastung laufen.

[8] ▶ Die Weltanbaufläche beträgt 1500 Millionen Hektar. Annahmen: 16 000 Kilometer jährliche Fahrleistung, Energieeffizienz entsprechend 3,8 Litern pro 100 Kilometer, Biomasse-Ertrag 15 Tonnen pro Hektar

[9] ▶ Durch Entwaldung werden heute ungefähr 2 Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr nicht in Biomasse gebunden. Annahme: Diese Rate sinkt bis 2056 auf die Hälfte im Business-as-usual- und auf null im Emissionsstopp-Szenario.

werbsfähiger Optionen für die Zukunft erhöht. Es ist auch sinnvoll, die langfristige Fehlbindung von Kapital mit politischen Mitteln zu verhindern. Die nachträgliche Umrüstung eines Kohlekraftwerks auf $CO_2$-Deponierung ist viel teurer als seine Ausstattung beim Neubau. Finanzielle Anreize könnten die Planung der Energieversorger in die richtige Richtung lenken. Schließlich sollte man durch geeignete Anreize die Elektrizitätswerke oder Mineralölfirmen dazu motivieren, für effizientere Nutzung ihrer Ware beim Kunden Sorge zu tragen. Das kann sich für diese Firmen sogar auszahlen, weil sie dann nicht – unter möglicherweise hohen Kosten – zusätzliche Kapazitäten bereitstellen müssen.

Wenn die Emissionen in einem Bereich zunehmen, müssen sie in anderen entsprechend abnehmen, damit das Ziel Nullwachstum eingehalten wird. Wird mehr Erdgas verbraucht, muss entsprechend weniger Öl und Kohle verbrannt werden. Wenn der Luftverkehr zunimmt, muss ein anderer Wirtschaftssektor das emittierte Treibhausgas einsparen. Und wenn die heutigen Dritte-Welt-Länder mehr ausstoßen, müssen die Industriestaaten mehr vermeiden.

Wie viel mehr? Es ist einfach, die Antwort einzugrenzen. Gegenwärtig verursachen die Industrienationen (genauer: die dreißig Mitglieder der *Organisation for Economic Cooperation and Development*, OECD) ziemlich genau die Hälfte der $CO_2$-Emissionen auf der Erde; alle anderen Länder der Welt – einschließlich der ehemaligen Sowjetunion – mit mehr als 80 Prozent der Weltbevölkerung teilen sich die andere Hälfte. Angesichts der enormen aufgestauten Energienachfrage der Nicht-OECD-Länder ist eine derartige Ungleichheit für die Zukunft unmöglich zu rechtfertigen. Auf der anderen Seite können die OECD-Mitgliedsstaaten ihren $CO_2$-Ausstoß nicht auf null reduzieren, und selbst wenn sie es könnten, bliebe den anderen Ländern der Welt gerade einmal Raum für eine Verdopplung, womit sie pro Kopf immer noch weit unter dem Industriestandard lägen.

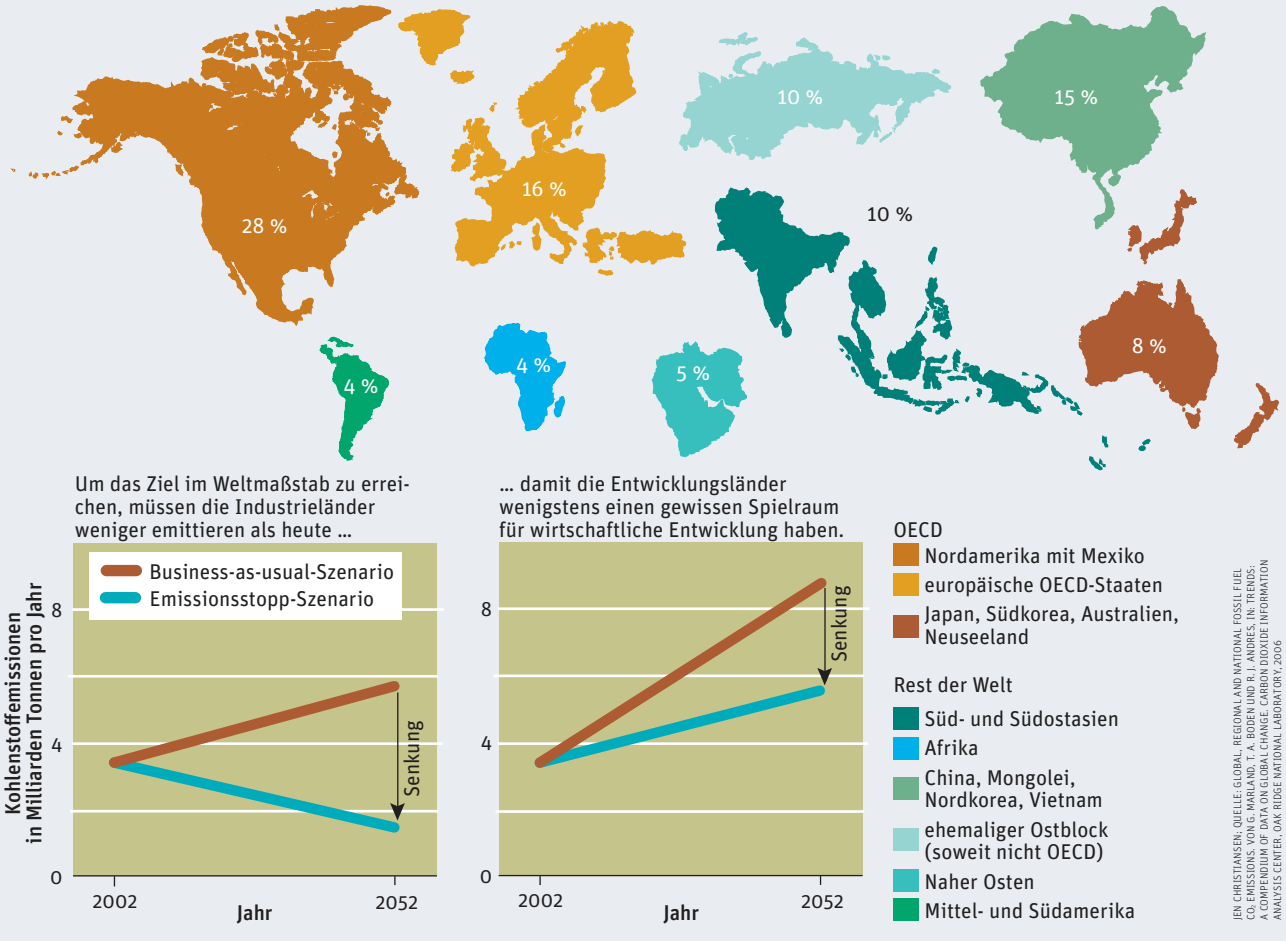
**Die amerikanische Umweltorganisation NRDC *(National Resources Defense Council)* hat in diesem Szenario ausgearbeitet, wie die USA binnen fünfzig Jahren ihre $CO_2$-Emissionen auf 60 Prozent des heutigen Standes reduzieren können.**

Ein denkbarer Kompromiss wäre es, wenn alle OECD-Länder das Ziel errei-

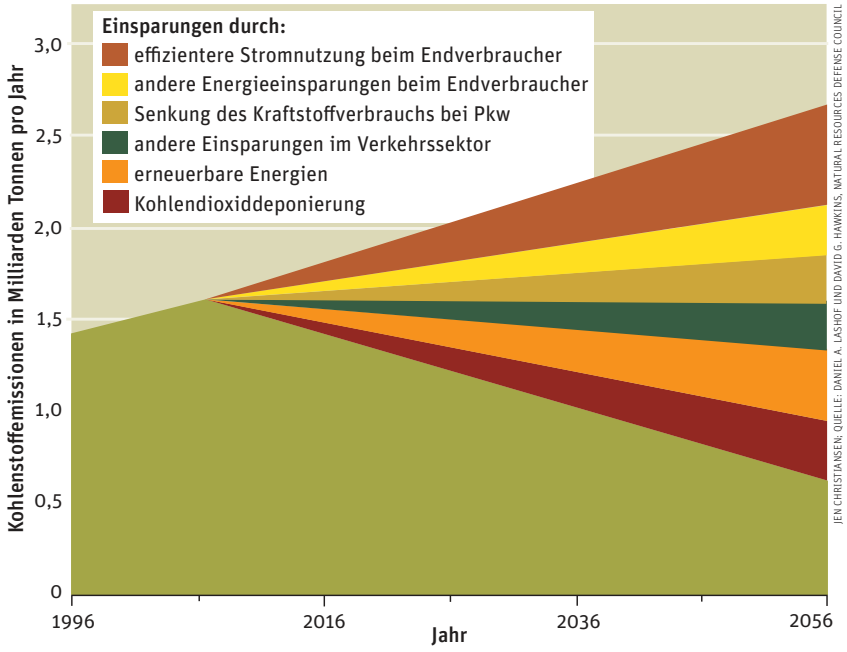
## Beiträge der Reichen und der Armen

**Um die globalen $CO_2$-Emissionen konstant zu halten,** müssen sowohl die Industriestaaten (hier definiert als Mitglieder der OECD) als auch die Entwicklungsländer in Zukunft deutlich weniger emittieren als bei einem ungeregelten Lauf der Entwicklung. Die Pfeile in den Grafiken unten zeigen einen von vielen möglichen Verläufen.

**Anteil an den weltweiten $CO_2$-Emissionen 2002**




JEN CHRISTIANSEN; QUELLE: GLOBAL, REGIONAL AND NATIONAL FOSSIL FUEL $CO_2$ EMISSIONS, VON G. MARLAND, T. A. BODEN UND R. J. ANDRES, IN: TRENDS: A COMPENDIUM OF DATA ON GLOBAL CHANGE. CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2006




chen würden, das Premierminister Tony Blair im Jahr 2003 für Großbritannien ausgerufen hat, nämlich eine Reduktion des Niveaus von 1990 um 60 Prozent bis 2050. Die anderen Länder könnten dann ihren Ausstoß um 60 Prozent steigern und hätten bis zur Mitte des Jahrhunderts die Hälfte des Industriestandards erreicht. Reiche wie arme Länder würden weit weniger emittieren als im Business-as-usual-Szenario, die USA nur noch ein Viertel der ansonsten zu erwartenden Menge. Damit würden die Amerikaner pro Kopf nicht mehr das Fünffache des Weltdurchschnitts in die Luft blasen, sondern nur noch das Doppelte.

Um diesen Vorsatz zu erfüllen, könnten die USA sich ein geeignetes Sortiment aus dem großen Kuchen zusammenstellen (Bild oben). Da alle Industriestaaten sich in einer annähernd vergleichbaren Situation befinden, werden sie ähnliche Strategien anwenden, voneinander lernen und dadurch die Kosten des ganzen Unternehmens senken.

Glücklicherweise steht das Ziel der $CO_2$-Reduzierung nicht im Widerspruch zu dem Ziel, die größte Armut der Welt zu beseitigen. Es ist zwar mit mehr Emissionen verbunden, wenn die Reichen die Ärmsten der Welt mit Strom und modernen Brennstoffen zum Kochen beliefern; aber das macht nicht mehr als ein Fünftel eines Keils aus.

Wir haben bislang nur die ersten 50 Jahre der Zukunft betrachtet. Man stelle sich die Weltgeschichte als Staffellauf vor. Im Jahr 2056 übergibt der erste 50-Jahre-Läufer den Stab an den zweiten. Das Prinzip der Generationengerechtigkeit erfordert, dass beide Läufer ungefähr gleich schwierige Aufgaben erhalten. Das scheint in unserem Emissionsstopp-Szenario der Fall zu sein: Dem zweiten Läufer wird die Aufgabe, die Emissionen auf die Hälfte zu reduzieren, gelingen, wenn der erste seine Aufgabe, den Treibhausgasausstoß konstant zu halten, ordentlich erledigt – und für den zweiten vorbereitende Forschung und Entwicklung betrieben hat. Revolutionäre Technologien wie das direkte Auswaschen des $CO_2$ aus der Luft, die Kohlenstoffspeicherung in Mineralien, die Kernfusion, nuklearthermisch erzeugter Wasserstoff und künstliche Photosynthese würden dem zweiten Läufer einen fliegenden Start verschaffen – und vielleicht schon dem ersten Beine machen, obgleich sich die Welt nicht darauf verlassen sollte.

## Blick zurück aus der Zukunft

Nehmen wir an, das Emissionsstopp-Szenario ist verwirklicht worden und wir blicken im Jahr 2056 in die Vergangenheit zurück: Wie hat sich die Welt verändert? Sparsamkeit in Energieproduktion und -verbrauch hat alle Lebensbereiche durchdrungen. Gebäude, Beleuchtungen, Kühlschränke und Verkehrsmittel haben sich grundlegend gewandelt, ebenso der Gebrauch, den wir von ihnen machen.

Die Welt verarbeitet annähernd so viele fossile Brennstoffe wie damals im Jahr 2006, aber das ganze System ist bis zur Unkenntlichkeit sauberer geworden. Strom, Kraftstoffe und Wärme werden zugleich in integrierten Anlagen produziert, Luft- und Wasserverschmutzung auf ein Minimum reduziert und der größte Teil des Kohlendioxids im Untergrund vergraben.

Neben dem fossilen existiert ein nichtfossiles Energiesystem der gleichen Größenordnung. Großflächige Nutzung erneuerbarer Energien hat abgelegenen Gegenden Aufschwung verschafft und verödetem Land durch Anbau von Bioethanol-Pflanzen zu neuem Wert verholfen. Falls Atomenergie überhaupt eine Bedeutung hat, sind starke internationale Kontrollmechanismen etabliert, die ihre militärische Nutzung verhindern. Die Wirtschaft ist weiter gewachsen; Arme wie Reiche sind reicher geworden. Und unsere Nachfahren müssen nicht alle ihre Kräfte ausschöpfen, um den Anstieg des Meeresspiegels, der Temperatur, der Anzahl von Wirbelstürmen und Dürrekatastrophen zu bewältigen.

Vor allem aber: Ein kollektives Gewissen ist erwacht und ruft die Menschen auf zu tun, was für die Gesunderhaltung unseres Planeten geboten ist. ◁

**Robert H. Socolow** und **Stephen W. Pacala** leiten die Aktion zur Milderung der $CO_2$-Folgen (*Carbon Mitigation Initiative*, CMI) an der Universität Princeton, wo Socolow Professor für Maschinenbau und Pacala Professor für Ökologie ist. Socolows Spezialgebiete sind energieeffiziente Techniken, globales Kohlenstoff-Management und unterirdische Kohlendioxid-Deponierung. Pacala erforscht die Wechselwirkung von Atmosphäre, Ozean und lebenden Organismen, insbesondere den globalen Kohlenstoffkreislauf. Er ist Direktor des Princeton Environmental Institute, zu dem die CMI gehört.



AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Sichere Energie im 21. Jahrhundert. Von Jürgen Petermann (Hg.). Hoffmann & Campe, Hamburg 2006

Weltmacht Energie. Herausforderung für Demokratie und Wohlstand. Von Peter Hennicke und Wolfgang Müller. 2. Auflage, Hirzel, Stuttgart 2006

Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. Von Stephen W. Pacala und Robert H. Socolow in: Science, Bd. 305, S. 968, 13. August 2004